



# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## ELABORACIÓN DE MEDIDAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE DE MADRID CON ACCIONES SOBRE EL PARQUE DE VEHÍCULOS

Autor: Alejandro Pelayo Cabezas

Director: Juan Norverto Moriño

Madrid

Julio de 2019



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. ALEJANDRO PELAYO CABEZAS DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ELABORACIÓN DE MEDIDAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE DE MADRID CON ACCIONES SOBRE EL PARQUE DE VEHÍCULOS, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. Objeto y fines de la cesión.***

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### ***3º. Condiciones de la cesión y acceso***

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ...22.. de .....JULIO..... de ...2019.....

ACEPTA



Fdo.....

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
ELABORACIÓN DE MEDIDAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE DE  
MADRID CON ACCIONES SOBRE EL PARQUE DE VEHÍCULOS  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2018/2019 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alejandro Pelayo Cabezas

Fecha: 22/ 07/ 2019

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Juan Norverto Moriño

Fecha: 22/ 07/ 2019





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## ELABORACIÓN DE MEDIDAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE DE MADRID CON ACCIONES SOBRE EL PARQUE DE VEHÍCULOS

Autor: Alejandro Pelayo Cabezas

Director: Juan Norverto Moriño

Madrid

Julio de 2019



# **ELABORACIÓN DE MEDIDAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE DE MADRID CON ACCIONES SOBRE EL PARQUE DE VEHÍCULOS**

**Autor: Pelayo Cabezas, Alejandro**

Director: Norberto Moriñigo, Juan

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

### **1. Introducción**

La contaminación del aire supone un gran riesgo para la salud de las personas, según la Organización Mundial de la Salud. Sus informes y mensajes avisando del reiterado incumplimiento de los límites de contaminantes en la atmósfera para proteger la salud de las personas son constantes y numerosos. Así, la OMS ha estimado en dos informes en el año 2014 que el 92% de la población mundial vive y respira en zonas donde los valores guía de la calidad del aire no se respetan en absoluto. Además, la OMS estimó que la contaminación del aire local a nivel troposférico provoca alrededor de tres millones de muertes prematuras, tanto en ciudades como en zonas rurales de todo el planeta. [NATU18]

Ante la gran magnitud que este problema presenta, es muy importante estudiar e identificar cuáles son las causas del mismo, así como diseñar políticas encaminadas a reducir estos niveles. También es imprescindible concienciar a los ciudadanos de que ellos son responsables y que sus acciones pueden servir para reducir la emisión de contaminantes en el ambiente.

De esta forma, las fuentes de emisión más importantes (o causas principales de este problema) son: el tráfico rodado, especialmente en las grandes ciudades; una baja eficiencia en el consumo energético en las viviendas; el uso de combustibles contaminantes en la generación de energía eléctrica y la falta de una eficiente gestión de los residuos industriales, agrícolas y municipales.

Por otro lado, a menor escala, Madrid lleva años sufriendo los problemas de la contaminación atmosférica. En Madrid, los contaminantes atmosféricos que dan más problemas son el dióxido de nitrógeno, las partículas en suspensión (especialmente las menores de 2,5 y 10 micras) y el ozono troposférico, el cual supone un problema en Madrid desde el año 2013. [ECOL18]

Durante los últimos años, la ciudad de Madrid ha visto como se superaban año tras año los límites de protección para la salud humana establecidos por las leyes europeas de estos contaminantes, lo cual implica superar los límites establecidos por la OMS, más estrictos todavía. Este hecho ha propiciado varios avisos por parte

de la Unión Europea, quienes amenazan con multar al ayuntamiento de Madrid si no se llevan a cabo medidas más estrictas para reducir la contaminación en el corto plazo.

Además, los datos de calidad del aire de Madrid son claros. Éstos muestran que el factor más importante a la hora de provocar este deterioro de la calidad del aire es el transporte por carretera. Así, el “Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la ciudad de Madrid” (Plan A) [AYUN17] elaborado por el ayuntamiento de Madrid liderado por Manuela Carmena y la “Estrategia de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Comunidad de Madrid 2013-2020” elaborado por el gobierno de la Comunidad de Madrid, en manos del Partido Popular, coinciden al concluir que el tráfico rodado es la principal causa de las emisiones de gases contaminantes en general, y de las emisiones de óxidos de nitrógeno en particular.

De esta forma, las modelizaciones que se han realizado para llevar a cabo las medidas expuestas en el Plan A del ayuntamiento de Madrid muestran que el tráfico de la capital de España es el responsable de cerca del 75% de las emisiones de óxidos de nitrógeno de media de las que se registran en toda la ciudad (en algunos puntos concretos, el tráfico es responsable de más del 80% de las emisiones de este contaminante).

Así, los niveles actuales de contaminación del aire de Madrid suponen un gran problema para la salud de los ciudadanos. La contaminación atmosférica provoca la aparición y el agravamiento tanto de enfermedades respiratorias como de enfermedades cardiovasculares y cánceres. En octubre de 2018 (con datos de 2015), la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), en su último informe, estima que fallecen de manera prematura alrededor de 400.000 personas anualmente dentro de los países de la Unión Europea. En el caso de España, 27.900 personas fallecen prematuramente debidas a las partículas menores de 2,5 micras, 8.900 debidas al dióxido de nitrógeno y 1.800 son debidas al ozono. Estos datos implican que en España el número de muertes a causa de la contaminación del aire es 24 veces mayor que el número de fallecimientos por accidentes de tráfico (en 2018 hubo 1.180 fallecimientos por esta causa).

Desde el año 2007 hasta el año 2014, en Madrid existió una tendencia a la baja del transporte motorizado debido en gran parte a la crisis económica en la que se encontraba todo el país. Esta tendencia se revirtió en los años 2015 y 2016, en los cuales se podía observar una situación de estabilidad con un cierto repunte del transporte rodado, por lo menos en algunas zonas de la capital. Por último, durante los dos últimos años (2017 y 2018) parece que la tendencia a la disminución del tráfico se ha recuperado.

Además del transporte rodado, las condiciones meteorológicas existentes cada año son un factor clave en los niveles de contaminación atmosférica que se registran

finalmente en Madrid, las cuales pueden ayudar a mejorar la situación en caso de favorecer la dispersión de gases contaminantes, o empeorarla, si el efecto que tienen sobre ellos hace que estos se concentren en el aire urbano. De esta forma, en el año 2017 prevalecieron condiciones climatológicas adversas, dada la situación de sequía y un alto número de episodios de anticiclón con fenómenos de inversión térmica, lo cual tuvo un efecto negativo sobre los niveles de contaminación. Por el contrario, en el año 2018, las condiciones meteorológicas fueron bastante favorables a la dispersión de contaminantes, aunque durante el mes de diciembre y los primeros días del año 2019 la situación empeoró considerablemente.

## **2. Metodología**

Dado que la principal causa de la contaminación del aire de Madrid es el transporte, la motivación de este trabajo se basa en elaborar un plan de mejora de la calidad del aire para la ciudad de Madrid. Éste se realizará a partir del estado actual desde un punto de vista ingenieril, estudiando las causas de la contaminación actual, así como sus mediciones y límites establecidos, con el fin de elaborar una serie de medidas factibles y sensatas para reducir o eliminar la emisión de los principales contaminantes, como son los óxidos de nitrógeno (NOx), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y las micropartículas en suspensión (PM).

La elaboración de estas medidas se enfocará en el parque de vehículos de la ciudad de Madrid, tanto en acciones que debe llevar a cabo tanto la administración desde un punto de vista legislativo y desde un punto de vista como propietario de las flotas de vehículos públicas, como los fabricantes desde un punto de vista de desarrollar tecnologías que reduzcan la emisión de contaminantes.

Para ello, primeramente, se definirá el estado del arte actual en cuanto a los contaminantes más peligrosos para la salud y sus causas. Con este fin, se estudiará cuál es el estado de estos contaminantes tanto en España como en Europa, los cuales se compararán para analizar el estado de España frente al resto de países. Después, se analizarán las causas y el origen de la contaminación en España, así como los factores que afectan a la gestión que conlleva conseguir una buena calidad del aire. A continuación, se analizarán las emisiones contaminantes en vehículos, mostrando qué contaminantes son aquellos que son resultado de la combustión de los motores. Para acabar el estado del arte, se analizará la calidad del aire de Madrid, para el cual se utilizará de apoyo el informe de calidad del aire de 2018 de Ecologistas en acción.

En segundo lugar, tras haber estudiado la calidad del aire actual tanto en España y Europa como en Madrid, se procederá a analizar la regulación de las emisiones en los vehículos, empezando por el nuevo proceso de homologación de emisiones (WLTP), resaltando las diferencias con el sistema de homologación anterior, para seguir con las normativas EURO, que son los estándares de emisiones europeos. Estas normativas EURO limitan las emisiones permitidas en vehículos, las cuales se

van haciendo más restrictivas con el paso del tiempo y el desarrollo de nuevas tecnologías. Para terminar, se analizarán las distintas etiquetas implementadas por la DGT que clasifican los vehículos en función de sus emisiones contaminantes. Estas etiquetas son imprescindibles para poder tomar medidas en contra de los vehículos más contaminantes y medidas a favor de aquellos coches menos contaminantes.

En tercer lugar, se estudiará el parque de vehículos de la ciudad de Madrid, tanto la flota de vehículos pública propiedad del ayuntamiento, como el parque circulante de particulares existente. La caracterización de este parque circulante es imprescindible para poder tomar medidas sobre él, con el fin de reducir la contaminación de los vehículos.

En cuarto lugar, se analizarán las medidas llevadas a cabo por los dos principales responsables en la mejora de la calidad del aire, que son la administración y los fabricantes de vehículos.

Por un lado, se estudiarán los planes llevados a cabo por las administraciones de las principales ciudades europeas para reducir sus niveles de contaminación, con el objetivo de extraer ideas que se puedan aplicar en Madrid. A continuación, se analizará cuál es el plan específico de la ciudad de Madrid para reducir la contaminación, conocido como “Plan de calidad del aire y cambio climático de la ciudad de Madrid”. Este plan se analizará para intentar proponer medidas alternativas y eficaces para la reducción de contaminantes de los vehículos.

Por otro lado, en cuanto a los fabricantes se estudiarán los tipos de vehículos que ofrecen y se analizarán las tecnologías de tratamiento de gases de escape que utilizan para disminuir la emisión de contaminantes.

En quinto lugar, se propondrán una serie de medidas en función de los responsables que deben tomarlas (administración y fabricantes). Así, por un lado, dentro de las medidas a tomar por los gobiernos se distinguirá entre: medidas directas sobre el parque de vehículos propiedad del ayuntamiento y medidas indirectas, en cuanto a la limitación del tráfico, con varias estimaciones de ahorro de emisiones. Por otro lado, se propondrán varias medidas que deben tomar los fabricantes (las cuales deberían ser promovidas y obligadas por la administración) en cuanto a la limitación electrónica de velocidad y aceleración para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, se propondrá un nuevo modo de homologación ciudad a través del cual los vehículos funcionarán en un modo de bajas emisiones al ser detectada su presencia dentro de la ciudad vía GPS (se establecerá como límite la M-30). Para mostrar su importancia y cuantificar las emisiones que se pueden ahorrar a través de estas medidas, se realizarán varias simulaciones y estimaciones en torno a un modelo.

### 3. Resultados

Los resultados de este trabajo de fin de máster son las medidas propuestas para mejorar la calidad del aire de la ciudad de Madrid, las cuales se pueden desglosar en función de quién sea el responsable de tomar dichas medidas.

En primer lugar, se estudiarán las acciones que puede llevar a cabo la administración, pudiendo ser éstas calificadas como medidas directas e indirectas. La única medida directa propuesta es:

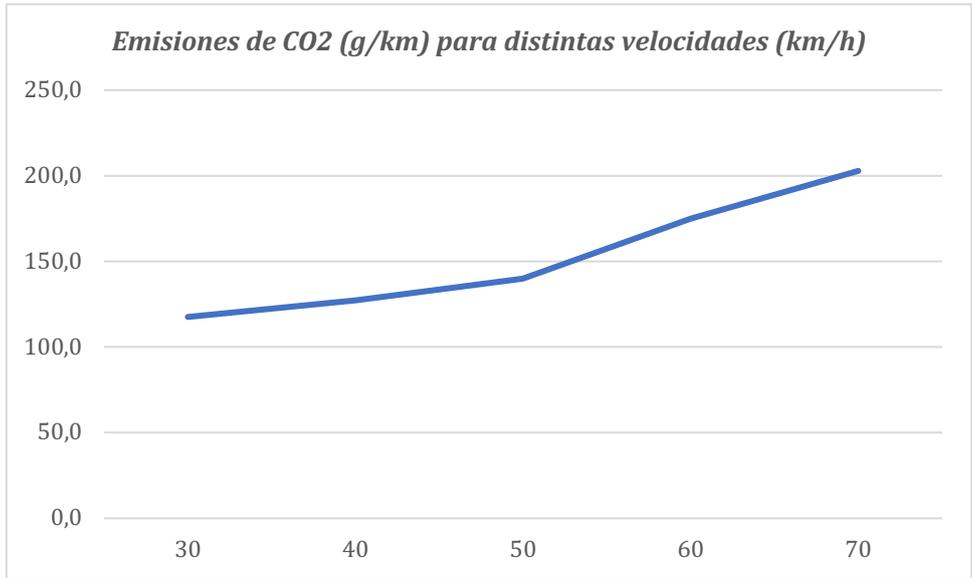
- Transformar la flota municipal en eléctrica: para lo cual se propone cambiar todos los vehículos sin etiqueta propiedad del ayuntamiento por vehículos eléctricos, lo cual ahorraría la emisión de 4.256.875 kilogramos de CO<sub>2</sub>, 6.050 kg de NO<sub>x</sub> y 605 kg de partículas en suspensión al año.

Por otro lado, se proponen las siguientes medidas indirectas, con el objetivo de fomentar la renovación del parque circulante y restricción del uso de los coches más contaminantes:

- Reducción de impuestos para la compra de vehículos eléctricos.
- Aumento de la red de puntos de carga en la ciudad de Madrid.
- Plan de ayudas para la compra de nuevos vehículos eléctricos en caso de devolver los vehículos más contaminantes, para lo cual se necesitaría un plan de más de 200 millones de euros solo en Madrid.
- Aumento de impuestos a los combustibles fósiles cuya recaudación vaya directa al plan de ayudas mencionado anteriormente.
- Reducción del impuesto de sociedades a empresas que fomenten la compra y uso de coches eléctricos.
- Mantener la restricción de circulación a los vehículos más contaminantes en el centro de Madrid (Madrid Central).
- Reducción de circulación de taxis sin clientes.
- Construcción de aparcamientos disuasorios en las afueras de la ciudad.
- Fomentar el uso de coches y motos compartidos.
- Fomentar el uso de un transporte público de calidad con precios asequibles.

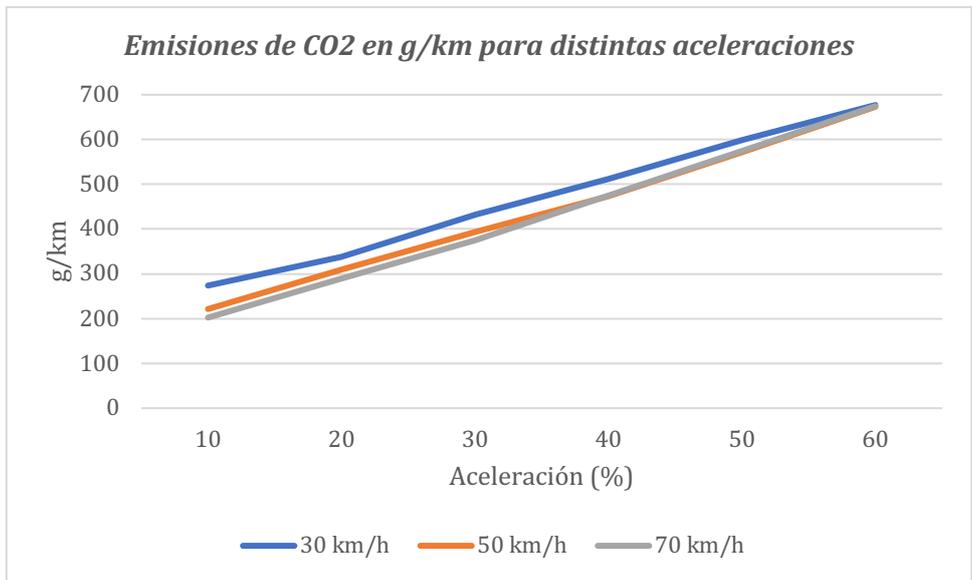
Por otro lado, los fabricantes deberían tomar las siguientes medidas:

- Limitación de velocidad en ciudad para disminuir el CO<sub>2</sub> emitido. La emisión de CO<sub>2</sub> aumenta al aumentar la velocidad, como se puede observar en la siguiente gráfica:



*Resultados de la simulación de emisiones variando la velocidad  
Fuente: Elaboración Propia*

- Limitación de aceleración en ciudad para disminuir el CO2 emitido. Además, el aumento de la aceleración también aumenta el consumo de CO2, como se puede observar en la siguiente gráfica:



*Resultados de la simulación de emisiones variando la aceleración  
Fuente: Elaboración Propia*

- Reprogramación de la unidad de control del motor para reducir la emisión de gases NOx a costa de aumentar el consumo y las emisiones de CO2. Mediante el aumento de la tasa de recirculación de gases de escape, se disminuye la temperatura de la combustión, lo cual reduce la emisión de óxidos de nitrógeno. Además, el retraso del punto de inyección de combustible disminuye la presión máxima, lo cual también reduce la

creación de NOx. Estas dos medidas aumentan el consumo y las emisiones de CO2, que se reducen mediante la aplicación de las dos medidas mencionadas anteriormente.

- Creación de un modo ciudad de bajas emisiones aplicando las tres medidas presentadas anteriormente siempre y cuando el vehículo se encuentre dentro de la ciudad (cuya posición la marcará un dispositivo GPS). Por otro lado, cuando el vehículo salga de la ciudad, la ECU optimizará el consumo de combustible a expensas de una mayor emisión de contaminantes.

#### **4. Conclusiones**

En conclusión, la administración debe tener como prioridad la reducción de contaminantes sobretodo en las grandes ciudades, dadas las amenazas de multa de la Unión Europea para favorecer la salud de los ciudadanos. Así, debe tomar medidas estrictas y desarrollar un plan a largo plazo acordado por la mayoría de partidos políticos para así evitar modificaciones cada cuatro años. Por tanto, existe una gran necesidad de un plan nacional (aparte de los municipales) de ayudas para la compra de vehículos eléctricos e híbridos, además de puntos de recarga. Además, es necesario concienciar a la gente (especialmente a los jóvenes desde los colegios) del uso del transporte público para reducir la contaminación en el largo plazo.

Es cierto que este plan debe tener un presupuesto muy alto, ya que todo cambio medioambiental conlleva un gran coste. Sin embargo, este plan es totalmente necesario por el bien del planeta y de la salud de las personas.

Por otro lado, también se debe concienciar a la gente de que hay que reducir el uso de coches de una persona, a no ser que sean coches pequeños no contaminantes, tanto por salud como por espacio.

Las medidas propuestas en este trabajo de fin de máster se han realizado con el objetivo de reducir las emisiones de los vehículos a corto plazo, teniendo en cuenta que en el año 2040 se prohibirá la venta de vehículos con motores de combustible fósil. Es cierto que estas medidas son bastante impopulares, pero la salud de las personas debe ser algo innegociable.

#### **5. Referencias**

[NATU18] Naturgy. (2018). “La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial.”

[ECOL18] Ecologistas en acción. (2018). “La calidad del aire en la ciudad de Madrid durante 2018.”

[AYUN17] Ayuntamiento de Madrid. (2017). “Plan de calidad del aire y cambio climático de la ciudad de Madrid.”



# **DEVELOPMENT OF MEASURES TO IMPROVE AIR QUALITY IN MADRID WITH ACTIONS ON THE VEHICLE FLEET**

**Author: Pelayo Cabezas, Alejandro**

Mentor: Norverto Moriñigo, Juan

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

### **1. Introduction**

Air pollution poses a great risk to people's health, according to the World Health Organization. Its reports and messages warning of the repeated non-compliance with the limits of pollutants in the atmosphere to protect people's health are constant and numerous. Thus, the WHO has estimated in two reports in 2014 that 92% of the world's population lives and breathes in areas where the guiding values of air quality are not respected at all. In addition, WHO estimated that local tropospheric air pollution causes about three million premature deaths, both in cities and in rural areas around the world. [NATU18]

Given the magnitude of this problem, it is very important to study and identify its causes, as well as to design policies aimed at reducing these levels. It is also essential to make citizens aware that they are responsible and that their actions can serve to reduce the emission of pollutants into the environment.

Thus, the most important emission sources (or main causes of this problem) are: road traffic, especially in large cities; low efficiency in energy consumption in homes; the use of polluting fuels in the generation of electricity and the lack of efficient management of industrial, agricultural and municipal waste.

On the other hand, on a smaller scale, Madrid has been suffering from air pollution problems for years. In Madrid, the atmospheric pollutants that cause the most problems are nitrogen dioxide, suspended particles (especially those smaller than 2.5 and 10 microns) and tropospheric ozone, which has been a problem in Madrid since 2013. [ECOL18]

During the last few years, the city of Madrid has seen how, year after year, the limits for the protection of human health established by the European laws against these pollutants were exceeded, which implies exceeding the limits established by the WHO, which are even stricter. This fact has led to several warnings from the European Union, who threaten to fine the city of Madrid if they do not carry out stricter measures to reduce pollution in the short term.

In addition, Madrid's air quality data is clear. They show that the most important factor in causing this deterioration in air quality is road transport. Thus, the "Air Quality and Climate Change Plan for the city of Madrid" (Plan A) [AYUN17] drawn up by the Madrid City Council led by Manuela Carmena and the "Air Quality and Climate Change Strategy for the Community of Madrid 2013-2020" drawn up by the government of the Community of Madrid, in the hands of the Partido Popular, coincide in concluding that road traffic is the main cause of polluting gas emissions in general, and of nitrogen oxide emissions in particular.

In this way, the modelling carried out to carry out the measures set out in Plan A of the Madrid City Council shows that traffic in the Spanish capital is responsible for around 75% of the average nitrogen oxide emissions recorded throughout the city (in some specific points, traffic is responsible for more than 80% of the emissions of this pollutant).

Thus, the current levels of air pollution in Madrid pose a major problem for the health of citizens. Air pollution causes the appearance and aggravation of both respiratory diseases and cardiovascular diseases and cancers. In October 2018 (with data from 2015), the European Environment Agency (EEA), in its latest report, estimates that around 400,000 people die prematurely annually within the countries of the European Union. In the case of Spain, 27,900 people die prematurely due to particles smaller than 2.5 microns, 8,900 due to nitrogen dioxide and 1,800 are due to ozone. These data imply that in Spain the number of deaths due to air pollution is 24 times higher than the number of deaths due to traffic accidents (in 2018 there were 1,180 deaths due to this cause).

From 2007 to 2014, there was a downward trend in motorized transport in Madrid, largely due to the economic crisis in which the whole country found itself. This trend was reversed in 2015 and 2016, when a situation of stability could be observed with a certain upturn in road transport, at least in some areas of the capital. Finally, over the last two years (2017 and 2018) it seems that the downward trend in traffic has recovered.

In addition to road transport, the weather conditions existing each year are a key factor in the levels of atmospheric pollution finally recorded in Madrid, which can help to improve the situation in the event of favoring the dispersion of polluting gases, or worsen it, if the effect they have on them makes them concentrate in the urban air. Thus, in 2017 adverse weather conditions prevailed, given the drought situation and a high number of anticyclone episodes with phenomena of thermal inversion, which had a negative effect on pollution levels. On the contrary, in 2018, meteorological conditions were quite favorable to the dispersion of pollutants, although during the month of December and the first days of 2019 the situation worsened considerably.

## **2. Methodology**

Since the main cause of air pollution in Madrid is transport, the motivation for this work is based on drawing up an air quality improvement plan for the city of Madrid. This will be carried out from the current state from an engineering point of view, studying the causes of current pollution, as well as its measurements and established limits, in order to develop a series of feasible and sensible measures to reduce or eliminate the emission of the main pollutants, such as nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and microparticles in suspension (PM).

The development of these measures will focus on the vehicle fleet of the city of Madrid, both in actions to be carried out both by the administration from a legislative point of view and from a point of view as owner of public vehicle fleets, as well as by manufacturers from a point of view of developing technologies that reduce the emission of pollutants.

In order to do this, first of all, the state of the art in terms of the most dangerous pollutants for health and their causes will be defined. To this end, we will study the state of these pollutants both in Spain and in Europe, which will be compared to analyze the state of Spain against other countries. Afterwards, the causes and origin of pollution in Spain will be analyzed, as well as the factors that affect the management involved in achieving good air quality. Next, pollutant emissions in vehicles will be analyzed, showing which pollutants are those resulting from engine combustion. To finish the state of the art, the air quality of Madrid will be analyzed, for which the 2018 air quality report of *Ecologistas en acción* will be used as a support.

Secondly, after having studied the current air quality in Spain and Europe as well as in Madrid, the regulation of emissions in vehicles will be analyzed, starting with the new emission homologation process (WLTP), highlighting the differences with the previous homologation system, in order to continue with the EURO regulations, which are the European emission standards. These EURO regulations limit the emissions allowed in vehicles, which become more restrictive with the passage of time and the development of new technologies. Finally, the different labels implemented by the DGT that classify vehicles according to their polluting emissions will be analyzed. These labels are essential in order to be able to take measures against the most polluting vehicles and measures in favor of those fewer polluting cars.

Thirdly, the vehicle fleet of the city of Madrid will be studied, both the public vehicle fleet owned by the city council and the existing circulating fleet of private individuals. The characterization of this fleet is essential to take action on it, in order to reduce vehicle pollution.

Fourthly, the measures carried out by the two main parties responsible for improving air quality, namely the administration and vehicle manufacturers, will be analyzed.

On the one hand, it will study the plans carried out by the administrations of the main European cities to reduce their pollution levels, with the aim of extracting ideas that can be applied in Madrid. Next, the specific plan of the city of Madrid to reduce pollution, known as the "Plan for air quality and climate change in the city of Madrid", will be analyzed. This plan will be analyzed in order to try to propose alternative and effective measures for the reduction of vehicle pollutants.

On the other hand, as far as manufacturers are concerned, the types of vehicles they offer will be studied and the exhaust gas treatment technologies they use to reduce the emission of pollutants will be analyzed.

Fifthly, a series of measures will be proposed depending on who is responsible for taking them (administration and manufacturers). Thus, on the one hand, within the measures to be taken by governments will be distinguished between: direct measures on the fleet of vehicles owned by the municipality and indirect measures, in terms of limiting traffic, with various estimates of emissions savings. On the other hand, several measures to be taken by manufacturers (which should be promoted and obligated by the administration) regarding electronic speed limitation and acceleration to reduce CO<sub>2</sub> emissions will be proposed. In addition, a new city type-approval mode will be proposed through which vehicles will operate in a low emission mode when their presence inside the city is detected via GPS (the M-30 will be established as a limit). To show its importance and quantify the emissions that can be saved through these measures, several simulations and estimates will be made around a model.

### **3. Results**

The results of this master thesis are the proposed measures to improve air quality in the city of Madrid, which can be broken down according to who is responsible for taking these measures.

In the first place, the actions that can be carried out by the administration will be studied, being these direct and indirect measures. The only direct measure proposed is:

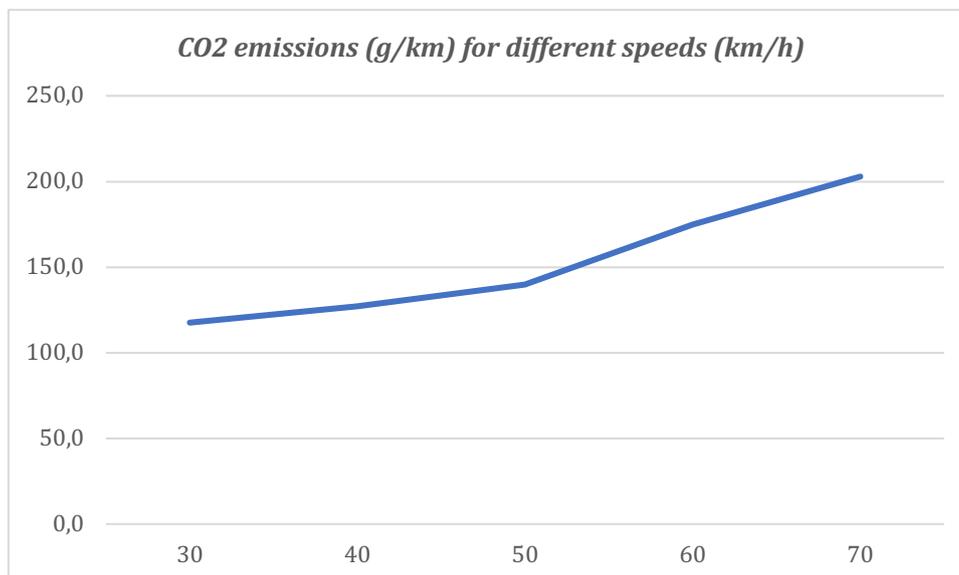
- Transform the municipal fleet into electric: for which it is proposed to change all vehicles without label owned by the municipality for electric vehicles, which would save the emission of 4,256,875 kilograms of CO<sub>2</sub>, 6,050 kg of NO<sub>x</sub> and 605 kg of particles in suspension per year.

On the other hand, the following indirect measures are proposed, with the aim of encouraging the renewal of the circulating fleet and restricting the use of the most polluting cars:

- Tax reduction for the purchase of electric vehicles.
- Increase in the network of charging points in the city of Madrid.
- Aid plan for the purchase of new electric vehicles in the event of returning the most polluting vehicles, for which a plan of more than 200 million euros would be needed in Madrid alone.
- Increase in taxes on fossil fuels whose collection goes directly to the aid plan mentioned above.
- Reduction of corporate tax on companies that encourage the purchase and use of electric cars.
- Maintain the traffic restriction for the most polluting vehicles in the center of Madrid (Madrid Central).
- Reduction in the circulation of taxis without customers.
- Construction of car parks on the outskirts of the city.
- Encourage the use of cars and shared motorbikes.
- Encourage the use of quality public transport at affordable prices.

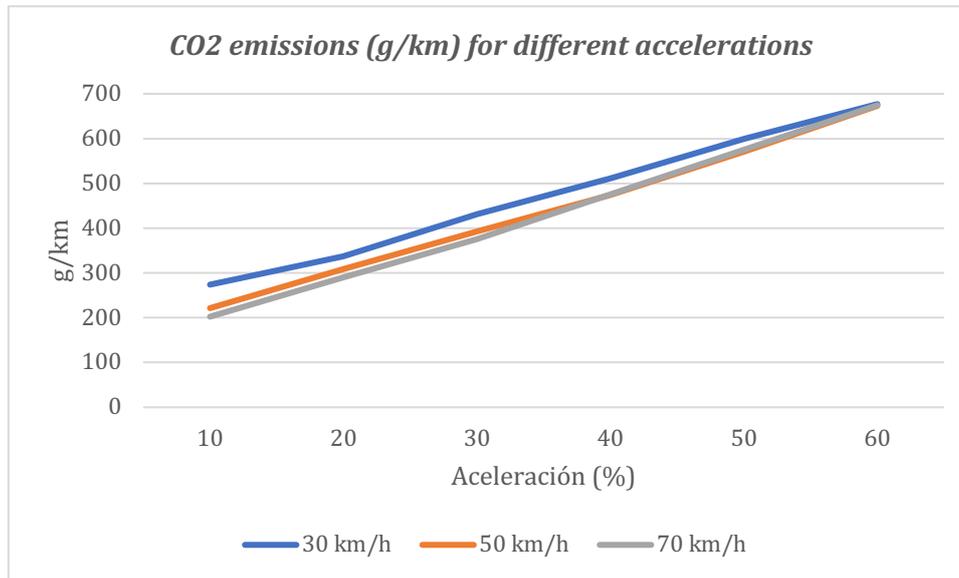
On the other hand, manufacturers should take the following measures:

- Limitation of speed in the city to reduce the CO<sub>2</sub> emitted. The CO<sub>2</sub> emission increases as the speed increases, as can be seen in the following graph:



*CO<sub>2</sub> emissions simulation results for different speeds  
Source: Prepared by the author*

- Limitation of acceleration in the city to reduce the CO<sub>2</sub> emitted. In addition, increased acceleration also increases CO<sub>2</sub> consumption, as can be seen in the graph below:



*CO<sub>2</sub> emissions simulation results for different accelerations*  
 Source: Prepared by the author

- Reprogramming of the engine control unit to reduce NO<sub>x</sub> emissions at the expense of increased fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions. By increasing the exhaust gas recirculation rate, the combustion temperature is lowered, reducing the emission of nitrogen oxides. In addition, the delay of the fuel injection point decreases the maximum pressure, which also reduces the creation of NO<sub>x</sub>. These two measures increase consumption and CO<sub>2</sub> emissions, which are reduced by applying the two measures mentioned above.
- Creation of a low emission city mode by applying the three measures presented above as long as the vehicle is within the city (whose position will be marked by a GPS device). On the other hand, when the vehicle leaves the city, the ECU will optimize fuel consumption at the expense of higher pollutant emissions.

#### 4. Conclusions

In conclusion, the administration must prioritize the reduction of pollutants especially in large cities, given the threats of fines from the European Union to promote the health of citizens. Thus, it must take strict measures and develop a long-term plan agreed by the majority of political parties in order to avoid modifications every four years. Therefore, there is a great need for a national plan (apart from the municipal ones) of aids for the purchase of electric and hybrid vehicles, as well as recharging points. In addition, it is necessary to make people (especially young

people in schools) aware of the use of public transport in order to reduce pollution in the long term.

It is true that this plan must have a very high budget, as any environmental change entails a great cost. However, this plan is absolutely necessary for the sake of the planet and people's health.

On the other hand, people must also be made aware that a person's use of cars must be reduced, unless they are small, non-polluting cars, both for health reasons and for space.

The measures proposed in this end-of-master work have been carried out with the aim of reducing emissions from vehicles in the short term, bearing in mind that in 2040 the sale of vehicles with fossil fuel engines will be banned. It is true that these measures are quite unpopular, but people's health must be non-negotiable.

## **5. References**

[NATU18] Naturgy. (2018). "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial."

[ECOL18] Ecologistas en acción. (2018). "La calidad del aire en la ciudad de Madrid durante 2018."

[AYUN17] Ayuntamiento de Madrid. (2017). "Plan de calidad del aire y cambio climático de la ciudad de Madrid."



## **Agradecimientos**

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi director del proyecto, Juan Norverto Moriño, por su ayuda, cercanía y disponibilidad durante todo el proyecto, quien me ha ayudado en todo lo que he necesitado cuando lo he necesitado.

En segundo lugar, me gustaría agradecer a todos mis compañeros (y amigos) del máster que me han ayudado a estar aquí hoy, sin los cuales estos dos años de aprendizaje y sufrimiento se me habría hecho mucho menos ameno.

Agradecer a la Universidad Pontificia de Comillas la oportunidad de cursar este máster habiendo venido de otra universidad, la Universidad Carlos III de Madrid, a la cual también me gustaría agradecer en este momento en el que me convierto en ingeniero industrial.

Por último, me gustaría agradecer a mis amigos, a mi familia, en especial a mis padres José Manuel y María Eugenia, y a mi hermana Raquel, y por supuesto a Mariona, por su apoyo y por haberme aguantado en los momentos más duros, ya que sin su ayuda no podría haber llegado hasta aquí.



## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>1</b>
1.1	CONTEXTO DEL PROYECTO .....	1
1.2	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	3
1.3	METODOLOGÍA.....	3
<b>2</b>	<b>ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>5</b>
2.1	¿CUÁLES SON LOS CONTAMINANTES MÁS CRÍTICOS PARA LA SALUD? .....	5
2.2	CALIDAD DEL AIRE EN ESPAÑA Y COMPARACIÓN CON OTROS PAÍSES.....	7
2.3	CAUSAS Y ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN ESPAÑA.....	13
2.4	EMISIONES CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS.....	17
2.5	ESTADO DEL AIRE EN MADRID.....	20
<b>3</b>	<b>¿CÓMO SE REGULAN LAS EMISIONES DE LOS VEHÍCULOS? .....</b>	<b>31</b>
3.1	HOMOLOGACIÓN WLTP.....	31
3.2	ESTÁNDARES DE EMISIONES EUROPEOS: NORMATIVAS EURO.....	34
3.3	DISTINTIVOS DE LA DGT SEGÚN EMISIONES EN ESPAÑA.....	36
<b>4</b>	<b>TIPOS DE VEHÍCULOS EN MADRID.....</b>	<b>39</b>
4.1	FLOTA MUNICIPAL DE VEHÍCULOS EN EL MUNICIPIO DE MADRID .....	39
4.2	PARQUE CIRCULANTE DE LA CIUDAD DE MADRID .....	40
<b>5</b>	<b>¿QUÉ SE ESTÁ HACIENDO PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ACTUALMENTE?.....</b>	<b>47</b>
5.1	PLANES PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN OTRAS CIUDADES DEL MUNDO .....	47
5.1.1	Barcelona, España.....	47
5.1.2	Berlín, Alemania .....	48
5.1.3	París, Francia .....	49
5.1.4	Londres, Reino Unido.....	51
5.1.5	Roma, Italia.....	52
5.1.6	Lisboa, Portugal .....	53
5.1.7	Ámsterdam, Países Bajos.....	55
5.1.8	Bruselas, Bélgica.....	56
5.1.9	Oslo, Noruega.....	56
5.1.10	Nueva York, Estados Unidos.....	57
5.2	ADMINISTRACIÓN, GOBIERNOS .....	57
5.2.1	Plan de mejora de la calidad del aire en Madrid.....	57
5.2.2	Incentivos para la renovación del parque de vehículos.....	61
5.3	FABRICANTES DE VEHÍCULOS.....	62
5.3.1	Modelos de vehículos existentes.....	62
5.3.2	Tecnologías de tratamiento de gases de escape.....	65
<b>6</b>	<b>MEDIDAS A TOMAR.....</b>	<b>69</b>

6.1	ADMINISTRACIÓN .....	69
6.1.1	Medidas directas .....	69
6.1.2	Medidas indirectas .....	71
6.2	FABRICANTES .....	75
6.2.1	Limitar velocidad en ciudad para disminuir el CO2 emitido .....	75
6.2.2	Limitar la aceleración de los vehículos para disminuir el CO2 emitido .....	84
6.2.3	Reprogramación de la ECU para reducir la emisión de gases NOx .....	88
6.2.4	Nueva homologación para ciudad .....	90
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>97</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Imagen 1. Concentración media anual de dióxido de nitrógeno en 2015 en Europa .....	10
Imagen 2. Concentraciones diarias de PM10 en valor límite diario en 2015 en Europa.....	11
Imagen 3. Concentración de ozono en valor diario en Europa en 2015.....	12
Imagen 4. Evolución de las emisiones de óxidos de nitrógeno en España entre 1990 y 2015 .....	13
Imagen 5. Concentración media anual de dióxido de nitrógeno en el municipio de Madrid por fuente de contaminación .....	14
Imagen 6. Concentración media anual de partículas PM2,5 en el municipio de Madrid por fuente de contaminación .....	15
Imagen 7. División por zonas del municipio de Madrid y ubicación de las 24 estaciones de medida.....	22
Imagen 8. Diferencia entre los perfiles de los dos tipos de homologación: NEDC y WLTP .....	33
Imagen 9. Evolución de los límites de emisiones de óxidos de nitrógeno en turismos diésel.....	35
Imagen 10. Evolución de los límites de emisiones de óxidos de nitrógeno en turismos gasolina.....	35
Imagen 11. Evolución de los límites de emisiones de partículas en suspensión en turismos diésel .....	36
Imagen 12. Comparativa de emisiones de NOx entre las reales y los límites de cada normativa EURO .....	38
Imagen 13. División de Madrid en zonas para el estudio del parque circulante en Madrid 2017 .....	41
Imagen 14. Distribución del parque de turismos por edades en Madrid.....	44
Imagen 15. Área medioambiental de Berlín .....	49
Imagen 16. Mapa de la zona de bajas emisiones de París.....	50
Imagen 17. Mapa de las dos zonas de bajas y ultrabajas emisiones de Londres .....	52
Imagen 18. Zona de bajas emisiones de la ciudad de Roma .....	53

Imagen 19. Zona de bajas emisiones de la ciudad de Lisboa.....	54
Imagen 20. Zona de bajas emisiones de la ciudad de Ámsterdam .....	55
Imagen 21. Catalizador SCR con urea utilizado en motores diésel.....	66
Imagen 22. Mapa de motor de un Volkswagen Passat 1.6 TDI 90 CV.....	76
Imagen 23. Fuerzas que actúan sobre las ruedas de un coche .....	77
Imagen 24. Gráfica de emisiones de CO2 en la simulación 1.....	82
Imagen 25. Gráfica de emisiones de CO2 en la simulación 2.....	84
Imagen 26. Gráfica de emisiones de CO2 para las distintas aceleraciones en la simulación 3.....	87
Imagen 27. Variación de contaminantes en función de la tasa de EGR.....	89
Imagen 28. Variación de contaminantes en función del punto de inyección en vehículos .....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los vehículos de carretera en Europa.....	18
Tabla 2. Estaciones de medida de la calidad del aire de Madrid.....	22
Tabla 3. Mediciones de dióxido de nitrógeno en las 24 estaciones de medida de Madrid en 2018.....	24
Tabla 4. Número de veces que se ha superado el límite establecido por la OMS de PM10 y PM2,5 en Madrid en 2018 por estaciones.....	26
Tabla 5. Número de veces que se han superado los límites legales y recomendados por la OMS de ozono en Madrid en 2018.....	27
Tabla 6. Límites de emisiones según normativas EURO para turismos diésel (en g/km).....	34
Tabla 7. Límites de emisiones según normativas EURO para turismos gasolina (en g/km).....	34
Tabla 8. Caracterización de la flota municipal de Madrid por distintivos DGT.....	40
Tabla 9. Zonificación establecida para el estudio del parque circulante de Madrid en 2017.....	41
Tabla 10. Composición del vehículo tipo por combustible y zona.....	42
Tabla 11. Distribución de turismos por distintivo de la DGT.....	43
Tabla 12. Distribución de vehículos ligeros por distintivo de la DGT.....	43
Tabla 13. Distribución de vehículos pesados por distintivo de la DGT.....	44
Tabla 14. Edad media de cada tipo de vehículo del parque circulante de Madrid 2017.....	44
Tabla 15. Distribución porcentual de recorridos por zonas en Madrid en 2016.....	45
Tabla 16. Emisiones de CO2 de los vehículos sin distintivo propiedad del ayuntamiento de Madrid.....	70
Tabla 17. Emisiones de NOx de los vehículos sin distintivo propiedad del ayuntamiento de Madrid.....	70
Tabla 18. Emisiones de partículas en suspensión de los vehículos sin distintivo propiedad del ayuntamiento de Madrid.....	71
Tabla 19. Desarrollos del cambio para el vehículo de la simulación.....	79
Tabla 20. Cálculo de potencias requeridas en motor para la simulación 1.....	81

Tabla 21. Cálculo de la presión media efectiva para la simulación 1.....	81
Tabla 22. Cálculo de emisiones de CO2 durante la simulación 1.....	81
Tabla 23. Cálculo de potencias requeridas en motor para la simulación 2.....	82
Tabla 24. Cálculo de la presión media efectiva para la simulación 2.....	83
Tabla 25. Cálculo de emisiones de CO2 durante la simulación 2.....	83
Tabla 26. Cálculo de la potencia demandada al motor en la simulación 3.....	85
Tabla 27. Cálculo de la presión media efectiva en la simulación 3.....	86
Tabla 28. Cálculo de emisiones de CO2 para las distintas aceleraciones en la simulación 3.....	87

# 1 Introducción y planteamiento del problema

## 1.1 Contexto del proyecto

La contaminación del aire supone un gran riesgo para la salud de las personas, según la Organización Mundial de la Salud. Sus informes y mensajes avisando del reiterado incumplimiento de los límites de contaminantes en la atmósfera para proteger la salud de las personas son constantes y numerosos. Así, la OMS expuso en dos informes en el año 2014 que el 92% de la población mundial reside y respira en zonas donde los valores guía de la calidad del aire no se respetan en absoluto. Además, la OMS estimó que la contaminación del aire local a nivel troposférico provoca alrededor de tres millones de muertes prematuras, tanto en ciudades como en zonas rurales de todo el planeta.

Ante la gran magnitud que este problema presenta, es muy importante estudiar e identificar cuáles son las causas del mismo, así como diseñar políticas encaminadas a reducir estos niveles. También es imprescindible concienciar a los ciudadanos para reducir la emisión de contaminantes con el objetivo de mejorar la calidad del aire que todos respiramos.

De esta forma, las fuentes de emisión más importantes (o causas principales de este problema) son: el tráfico rodado, especialmente en las grandes ciudades; una baja eficiencia en el consumo energético en las viviendas; el uso de combustibles contaminantes en la generación de energía eléctrica y la falta de una eficiente gestión de los residuos industriales, agrícolas y municipales.

Por otro lado, a menor escala, Madrid lleva años sufriendo los problemas de la contaminación atmosférica. En Madrid, los contaminantes atmosféricos que dan más problemas son el dióxido de nitrógeno, las partículas en suspensión (especialmente las menores de 2,5 y 10 micras) y el ozono troposférico, el cual supone un problema en Madrid desde el año 2013.

Durante los últimos años, la ciudad de Madrid ha visto como se superaban año tras año los límites de protección para la salud humana establecidos por las leyes europeas de estos contaminantes, lo cual implica superar los límites establecidos por la OMS, más estrictos todavía.

Además, los datos de calidad del aire de Madrid son claros. Éstos muestran que el factor más importante a la hora de provocar este deterioro de la calidad del aire es el transporte por carretera. Así, el “Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la ciudad de Madrid” (Plan A) elaborado por el ayuntamiento de Madrid liderado por

Manuela Carmena y la “Estrategia de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Comunidad de Madrid 2013-2020” elaborado por el gobierno de la Comunidad de Madrid, en manos del Partido Popular, coinciden al concluir que el tráfico rodado es la principal causa de las emisiones de gases contaminantes en general, y de las emisiones de óxidos de nitrógeno en particular.

De esta forma, las modelizaciones que se han realizado para llevar a cabo las medidas expuestas en el Plan A del ayuntamiento de Madrid muestran que el tráfico de la capital de España es el responsable de cerca del 75% de las emisiones de óxidos de nitrógeno de media de las que se registran en toda la ciudad (en algunos puntos concretos, el tráfico es responsable de más del 80% de las emisiones de este contaminante).

Así, los niveles actuales de contaminación del aire de Madrid suponen un gran problema para la salud de los ciudadanos. La contaminación atmosférica provoca la aparición y el agravamiento tanto de enfermedades respiratorias como de enfermedades cardiovasculares y cánceres. En octubre de 2018 (con datos de 2015), la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), en su último informe, estima que fallecen de manera prematura alrededor de 400.000 personas anualmente dentro de los países de la Unión Europea. En el caso de España, 27.900 personas fallecen prematuramente debidas a las partículas menores de 2,5 micras, 8.900 debidas al dióxido de nitrógeno y 1.800 son debidas al ozono. Estos datos implican que en España el número de muertes a causa de la contaminación del aire es 24 veces mayor que el número de fallecimientos por accidentes de tráfico (en 2018 hubo 1.180 fallecimientos por esta causa).

Desde el año 2007 hasta el año 2014, en Madrid existió una tendencia a la baja del transporte motorizado debido en gran parte a la crisis económica en la que se encontraba todo el país. Esta tendencia se revirtió en los años 2015 y 2016, en los cuales se podía observar una situación de estabilidad con un cierto repunte del transporte rodado, por lo menos en algunas zonas de la capital. Por último, durante los dos últimos años (2017 y 2018) parece que la tendencia a la disminución del tráfico se ha recuperado. De esta forma, según los datos del ayuntamiento de Madrid sobre las intensidades medias del tráfico para la M-30, el tráfico se redujo un 4,5% por esta vía entre los años 2007 y 2014. Entre los años 2014 y 2016, el tráfico por la M-30 aumentó un 3,3%, para luego entre los años 2016 y 2018 volver a reducirse en un 2,3%.

Además del transporte rodado, las condiciones meteorológicas existentes cada año son un factor clave en los niveles de contaminación atmosférica que se registran finalmente en Madrid, las cuales pueden ayudar a mejorar la situación en caso de favorecer la dispersión de gases contaminantes, o empeorarla, si el efecto que tienen

sobre ellos hace que estos se concentren en el aire urbano. De esta forma, en el año 2017 prevalecieron condiciones climatológicas adversas, dada la situación de sequía y un alto número de episodios de anticiclón con fenómenos de inversión térmica, lo cual tuvo un efecto negativo sobre los niveles contaminación. Por el contrario, en el año 2018, las condiciones meteorológicas fueron bastante favorables a la dispersión de contaminantes, aunque durante el mes de diciembre y los primeros días del año 2019 la situación empeoró considerablemente.

## 1.2 Motivación y objetivos del proyecto

Dado que la principal causa de la contaminación del aire de Madrid es el transporte, la motivación de este trabajo se basa en elaborar un plan de mejora de la calidad del aire para la ciudad de Madrid. Éste se realizará a partir del estado actual desde un punto de vista ingenieril, estudiando las causas de la contaminación actual, así como sus mediciones y límites establecidos, con el fin de elaborar una serie de medidas factibles y sensatas para reducir o eliminar la emisión de los principales contaminantes, como son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y las micropartículas en suspensión (PM).

La elaboración de estas medidas se enfocará en el parque de vehículos de la ciudad de Madrid, tanto en acciones que debe llevar a cabo tanto la administración desde un punto de vista legislativo y desde un punto de vista como propietario de las flotas de vehículos públicas, como los fabricantes desde un punto de vista de desarrollar tecnologías que reduzcan la emisión de contaminantes.

## 1.3 Metodología

Para ello, primeramente, se definirá el estado del arte actual en cuanto a los contaminantes más peligrosos para la salud y sus causas. Con este fin, se estudiará cuál es el estado de estos contaminantes tanto en España como en Europa, los cuales se compararán para analizar el estado de España frente al resto de países. Después, se analizarán las causas y el origen de la contaminación en España, así como los factores que afectan a la gestión que conlleva conseguir una buena calidad del aire. A continuación, se analizarán las emisiones contaminantes en vehículos, mostrando qué contaminantes son aquellos que son resultado de la combustión de los motores. Para acabar el estado del arte, se analizará la calidad del aire de Madrid, para el cual se utilizará de apoyo el informe de calidad del aire de 2018 de Ecologistas en acción.

En segundo lugar, tras haber estudiado la calidad del aire actual tanto en España y Europa como en Madrid, se procederá a analizar la regulación de las emisiones en

los vehículos, empezando por el nuevo proceso de homologación de emisiones (WLTP), resaltando las diferencias con el sistema de homologación anterior, para seguir con las normativas EURO, que son los estándares de emisiones europeos. Estas normativas EURO limitan las emisiones permitidas en vehículos, las cuales se van haciendo más restrictivas con el paso del tiempo y el desarrollo de nuevas tecnologías. Para terminar, se analizarán las distintas etiquetas implementadas por la DGT que clasifican los vehículos en función de sus emisiones contaminantes. Estas etiquetas son imprescindibles para poder tomar medidas en contra de los vehículos más contaminantes y medidas a favor de aquellos coches menos contaminantes.

En tercer lugar, se estudiará el parque de vehículos de la ciudad de Madrid, tanto la flota de vehículos pública propiedad del ayuntamiento, como el parque circulante de particulares existente. La caracterización de este parque circulante es imprescindible para poder tomar medidas sobre él, con el fin de reducir la contaminación de los vehículos.

En cuarto lugar, se analizarán las medidas llevadas a cabo por los dos principales responsables en la mejora de la calidad del aire, que son la administración y los fabricantes de vehículos.

Por un lado, se estudiarán los planes llevados a cabo por las administraciones de las principales ciudades europeas para reducir sus niveles de contaminación, con el objetivo de extraer ideas que se puedan aplicar en Madrid. A continuación, se analizará cuál es el plan específico de la ciudad de Madrid para reducir la contaminación, conocido como "Plan de calidad del aire y cambio climático de la ciudad de Madrid". Este plan se analizará para intentar proponer medidas alternativas y eficaces para la reducción de contaminantes de los vehículos.

Por otro lado, en cuanto a los fabricantes se estudiarán los tipos de vehículos que ofrecen y se analizarán las tecnologías de tratamiento de gases de escape que utilizan para disminuir la emisión de contaminantes.

En quinto lugar, se propondrán una serie de medidas en función de los responsables que deben tomarlas (administración y fabricantes). Así, por un lado, dentro de las medidas a tomar por los gobiernos se distinguirá entre: medidas directas sobre el parque de vehículos propiedad del ayuntamiento y medidas indirectas, en cuanto a la limitación del tráfico, con varias estimaciones de ahorro de emisiones. Por otro lado, se propondrán varias medidas que deben tomar los fabricantes (las cuales deberían ser promovidas y obligadas por la administración) en cuanto a la limitación electrónica de velocidad y aceleración para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además, se propondrá un nuevo modo de homologación ciudad a través del cual los vehículos funcionarán en un modo de bajas emisiones al ser detectada su presencia dentro de la ciudad vía GPS (se establecerá como límite la M-30).

## 2 Estado del arte

### 2.1 ¿Cuáles son los contaminantes más críticos para la salud?

Se consideran contaminantes críticos a aquellos cuya concentración en la atmósfera supere los umbrales legales o los valores límite que dicta la Organización Mundial de la Salud (OMS) para proteger a la salud humana (World Health Organization 2005).

A nivel mundial, las concentraciones de gases contaminantes que se alcanzan varían considerablemente, así como las diferencias entre los distintos marcos legales nacionales que exigen distintos límites de concentraciones para cada tipo de contaminante. Sin embargo, la OMS en sus proyectos REVIHAAP (Review of evidence on health aspects of air pollution (Festy 2013)) y HRAPIE (Health risks of air pollution in Europe), que son sus más recientes informes sobre los efectos que producen en la salud humana la contaminación atmosférica, advierte expresamente que el contaminante con mayor impacto son las partículas en suspensión (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>). Consecuentemente, las partículas en suspensión son el contaminante más analizado en todo el mundo.

En los países en vías de desarrollo, los metales, los contaminantes orgánicos persistentes (conocidos como POPs), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y otros contaminantes como el benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) o el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) pueden superar los valores límites de protección. Sin embargo, en las regiones desarrolladas no suele ocurrir lo mismo. En ellas, los contaminantes principales suelen ser el dióxido de nitrógeno, las partículas en suspensión de diámetro inferior a 10 y a 2,5 micras (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>). Además, el incremento en utilización de calefacciones domésticas y residenciales mediante la combustión de biomasa y de carbón en ciudades desarrolladas, se ha reconocido como la primera causa del crecimiento de concentraciones ambientales (EEA 2016) de partículas en suspensión y benzopireno (el cual es un hidrocarburo aromático policíclico).

Por todo ello, es muy complicado equiparar la calidad del aire de las diferentes ciudades del mundo, de la misma manera que es muy difícil comparar el impacto de la calidad del aire en el deterioro de la salud, ya que cada ciudad tiene unos contaminantes críticos distintos debido a las condiciones de cada ciudad. Con el fin de mostrar una comparación, en Pekín, la calidad del aire está claramente perjudicada por los altos niveles de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y dióxido de azufre, con medias anuales cercanas a 80 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub> y 100 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> (Song C., Wu L., Xie Y.,

He J., Chen X., Wang T., Lin Y., Jin T., Wang A., Liu Y., Dai Q., Liu B., Wang Y.N 2017), las cuales proceden principalmente de la industria, de las calefacciones domésticas de carbón, de la generación de electricidad y del tráfico rodado. Por otro lado, en Madrid en 2016 (Ayuntamiento de Madrid 2018) el contaminante crítico es considerado el dióxido de nitrógeno, con medias anuales que superan las  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (levemente inferior a las de Pekín, con medias anuales entre  $60$  y  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), superando más de 35 veces al año el valor horario límite de  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , así como el ozono y las PM<sub>2,5</sub>, con valores medios anuales mayores a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (valores muy inferiores a los de Pekín).

Por otra parte, en cuanto al dióxido de nitrógeno de Madrid, el 70% del NO<sub>2</sub> que es respirado por un habitante es producido por el tráfico rodado. Es por todo ello, que las dos ciudades mencionadas difieren tanto en niveles de contaminación como en cuáles son los contaminantes críticos y las fuentes que los causan.

De acuerdo con los datos de emisiones oficiales europeos (EMEP-CEIP 2017), la fuente principal de emisiones de óxidos de nitrógeno y la segunda en humo negro, PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> primario es el tráfico rodado. La primera causa de emisiones de PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> primario, benzopireno y humo negro son las calefacciones de carbón y biomasa. Por otra parte, la agricultura domina las emisiones de amoníaco y la generación eléctrica las de dióxido de azufre.

Por otro lado, lo que aporta cada fuente de contaminantes al inventario de emisiones no es equivalente a lo que estas contribuyen a los niveles de exposición de los habitantes europeos. Un factor clave es la cercanía de la fuente de emisiones dado que, a la vez que el transporte rodado emite gases contaminantes muy cerca de los habitantes, un tipo de central térmica emite en altura y se encuentra más alejada de los ciudadanos. Por esta razón, el impacto que tendrá una misma cantidad de emisiones en estos dos casos será muy diferente en los niveles de exposición. Por lo cual, si hablamos de la ciudad de Barcelona, el transporte rodado contribuye con un 60% a los niveles en el aire ambiente de dióxido de nitrógeno. Sin embargo, la contribución de este en cuanto a emisiones de óxidos de nitrógeno al inventario municipal se ve disminuido hasta el 40%.

Si hablamos de las partículas PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>, el proyecto AIRUSE-LIFE+ (Querol 2017) ha concluido que en cinco ciudades europeas (Barcelona, Florencia, Atenas, Oporto y Milán) el transporte rodado supone un 25-35% de las emisiones medias anuales, teniendo en consideración las emisiones del tubo de escape, las de la abrasión de los frenos, ruedas y firme de rodadura (Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V.L., Colombi C., Alves C., Nunes T., Cerqueira M., Pio C., Eleftheriadis K., Diapouli E., Reche C., Minguillón M.C., Manousakas M.I., Maggos T., Vratolis S., and R.M. 2016). Además,

es de mencionar el hecho de que el inventario de emisiones de las partículas PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub> se refiera sólo al material primario (partículas líquidas y sólidas emitidas directamente), dado que cerca del 70% de las partículas PM<sub>2,5</sub> y el 60% de las PM<sub>10</sub> está conformado por material secundario (el cual se produce en la atmósfera a partir de gases reactivos como dióxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y amoníaco).

## 2.2 Calidad del aire en España y comparación con otros países

En España la evaluación de la calidad del aire se realiza mediante la información que envían las distintas redes de control y vigilancia de calidad del aire al MAPAMA (Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, recientemente dividido en dos, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ministerio para la Transición Ecológica), para el cual utilizan un enfoque común bajo criterios que se han establecido comunes también. Existen tres redes de control y vigilancia de calidad del aire en función de la región, que son:

- Redes de las Comunidades Autónomas: recogen y evalúan los contaminantes regulados por la legislación vigente.
- Redes de entidades locales: de la misma manera, pero a nivel municipal (ayuntamientos).
- Red EMEP/VAG/CAMP: gestionada por la AEMET (Agencia Española de Meteorología), se dedica a observar la calidad del aire de manera estatal, sobretodo en zonas rurales remotas.

Los principales contaminantes que se miden para evaluar la calidad del aire en las diferentes regiones de España son: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), partículas en suspensión (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>), monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>), cadmio, plomo, benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>), arsénico, benzopireno y níquel.

Para evaluar la calidad del aire, se consideran los diferentes objetivos de calidad que se encuentran fijados en el Real Decreto 102/2011 del 28 de enero, el cual determina que la evaluación de la calidad del aire se debe llevar a cabo en función del nivel de los contaminantes respecto a unos valores límite objetivo, para la cual se utilizan mediciones fijas, técnicas de modelización, campanas de mediciones representativas, mediciones indicativas o investigaciones, así como una combinación de algunos (o incluso de todos) de estos métodos.

Toda esta información es recogida por el MAPAMA, con la cual, a finales de septiembre de cada año, publica un informe de Evaluación de Calidad del Aire (MAPAMA 2017), el cual tiene por objetivo mostrar los resultados obtenidos de la evaluación de la calidad del aire del año propio. Para ello se basa en la información comunicada a la Comisión Europea, con el fin de cumplir las obligaciones determinadas en la Decisión de Ejecución de la Comisión del 12 de diciembre de 2011. En la misma se establecen disposiciones para las Directivas 2004/107/CE y 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relacionadas con el intercambio de información recíproco y la notificación sobre la calidad del aire ambiente, explicando cómo se encuentran las diferentes zonas respecto a los valores legislados (Naturgy 2018). En el caso de España, existen tres parámetros, de todos los analizados por las redes de control, que exceden en reiteradas ocasiones los valores límite establecidos por ley, que son las partículas en suspensión PM10, el dióxido de nitrógeno y el ozono.

Seguidamente, se ha realizado un análisis sobre estos tres contaminantes en España durante 2016 y sobre cómo han ido variando a lo largo de los últimos años, el cual se muestra a continuación:

### **Partículas en suspensión PM10**

España muestra altos niveles de partículas en suspensión debido a su ubicación geográfica, las cuales se generan de forma natural en el polvo que proviene de África, el cual llega a España por el movimiento del viento. Estas partículas de polvo no se contabilizan a la hora de cumplir con los valores límite establecidos por ley. Para ello, hay que descontar las partículas que provienen de fuentes naturales, para lo cual la Comisión Europea creó un método con el fin de identificar y restar en el caso de que se sobrepasen los límites debido a fuentes naturales para poder conocer cuánto afectan a dichos niveles y saber realmente cuál es el grado de partículas que se deben a la acción humana.

Así, una vez descontado las partículas debidas a fuentes naturales, durante 2016 se ha sobrepasado el valor límite diario en tres zonas, que son: Asturias Central, Plana de Vic y Villanueva del Arzobispo. En cuanto al valor límite anual, únicamente se sobrepasó en la zona de Asturias Central.

En cuanto a la comparación respecto a los años anteriores, se puede apreciar que en el año 2016 el número de veces que se sobrepasaron los límites diarios se redujo de 16 estaciones en el año 2012 a únicamente 2 estaciones en 2016 para estaciones en zonas industriales, mientras que en estaciones urbanas y suburbanas se redujo el número de 11 estaciones a 4.

Estos datos muestran que las principales causas que provocan que se superen los límites de este tipo de contaminante son el transporte rodado, los procesos de combustión y los procesos industriales.

### **Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

En el informe del MAPAMA del año 2016, se muestra que se produjeron problemas debido a que el valor límite horario y el valor límite anual fueron superados. El valor límite horario sólo fue superado en Madrid, mientras que el valor límite anual fue superado en siete áreas, que son: Área de Barcelona; Vallès-Baix Llobregat; L'Horta; Granada y Área Metropolitana; Madrid; Corredor del Henares y La Palma, La Gomera y El Hierro.

En todas estas áreas, a excepción del área de La Palma, La Gomera y El Hierro, la principal causa de contaminación de dióxido de nitrógeno ha sido el transporte rodado, lo cual aumenta la necesidad de proponer medidas sobre los vehículos para reducir este tipo de emisiones.

En comparación con los años anteriores, se puede afirmar que en 2016 se ha recuperado la tendencia favorable existente desde 2005, la cual es especialmente considerable en las estaciones urbanas y de tráfico, dado que en las estaciones en ámbitos rurales se mantienen en valores estables.

### **Ozono (O<sub>3</sub>)**

Debido a la climatología y a la elevada insolación que sufre España, el ozono troposférico supone un gran problema para el país. Desde el año 2011 hasta el año 2016, los datos de este tipo de contaminante muestran que el número de veces que se sobrepasaron los límites establecidos fueron reduciéndose año a año, a excepción de un pequeño repunte en 2015, que se redujo en 2016.

En cuanto a los distintos tipos de estaciones, en las estaciones industriales y rurales, se redujo el número de veces que se sobrepasaron los valores límite objetivo entre 2012 y 2016. También se redujo en las estaciones de tráfico en 2016, revirtiendo la tendencia alcista existente hasta 2015. Sin embargo, el número de veces que se superaron en estaciones urbanas y suburbanas aumentó durante estos años.

Las tendencias de estos tres contaminantes en España en los últimos años muestran dos cosas: que el número de veces que se superan los valores límites se está reduciendo, aunque todavía se podrían reducir más, y que una de las principales causas de emisión es el transporte rodado, objeto de estudio de este trabajo de fin de máster.

### **Situación en la Unión Europea**

Todos los años, la Agencia Europea de Medio Ambiente redacta el Informe sobre la calidad del aire en Europa (EEA 2017). En su versión del año 2017, se muestra una visión general de la calidad del aire entre el año 2000 y el 2015. Además, presenta un análisis de la situación actual respecto a los valores límite determinados por las directivas europeas de calidad del aire.

Este informe se utilizará para llevar a cabo una comparación entre la situación de la calidad del aire en España respecto a los países pertenecientes a la Unión Europea. Dicha comparación se llevará a cabo sobre los tres contaminantes presentados anteriormente, los cuales muestran mayores problemas de cumplimiento respecto a los requisitos determinados por las directivas europeas, que son: el dióxido de nitrógeno, las partículas en suspensión PM10 y el ozono.

### Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

En el estudio realizado por la Agencia Europea de Medio Ambiente se puede observar que en 22 de los 28 países miembros se superó el valor límite anual de dióxido de nitrógeno. La localización en la que se encuentran las estaciones que presentaron valores superiores a los límites demuestra que es un problema ampliamente extendido a través de todo el continente, como se puede observar en la imagen 1.

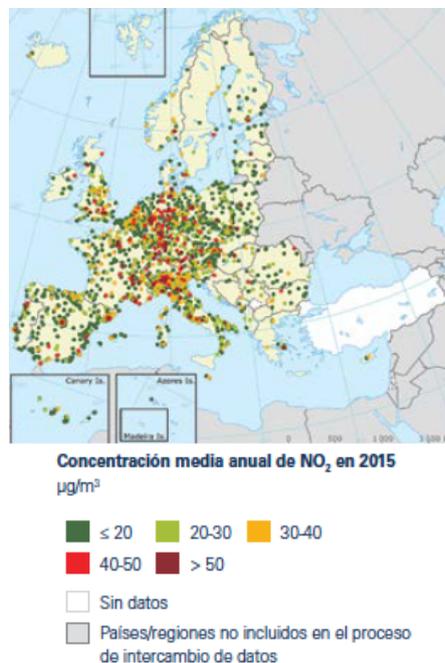


Imagen 1. Concentración media anual de dióxido de nitrógeno en 2015 en Europa

Fuente: "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial", Naturgy

Dentro de los diferentes tipos de estaciones, se puede observar que un 89% de las estaciones en las que se superaron los límites de contaminantes (aquellos puntos de color rojo y marrón) eran de tráfico. Además, dentro del tipo de zonas, el 98% de superaciones se dieron en zonas urbanas o suburbanas. Estos dos datos demuestran que los problemas que existen en España respecto al dióxido de nitrógeno son similares a los que sufre el resto de Europa, que ocurren en zonas urbanas y la fuente principal de contaminación es el tráfico.

En cuanto al valor límite horario, las únicas estaciones de fondo urbano en las que se sobrepasaron los límites fueron las establecidas en Madrid. El resto de las estaciones que sobrepasaron el límite horario fueron estaciones de tráfico urbano en prácticamente todos los casos.

### Partículas en suspensión PM10

Durante 2015, se registraron superaciones de partículas PM10 respecto al valor límite diario en el 19% de las estaciones, como se puede apreciar en la imagen 2. Sin embargo, únicamente en el 3% del total de estaciones se encontraron superaciones sobre el límite del valor medio anual.

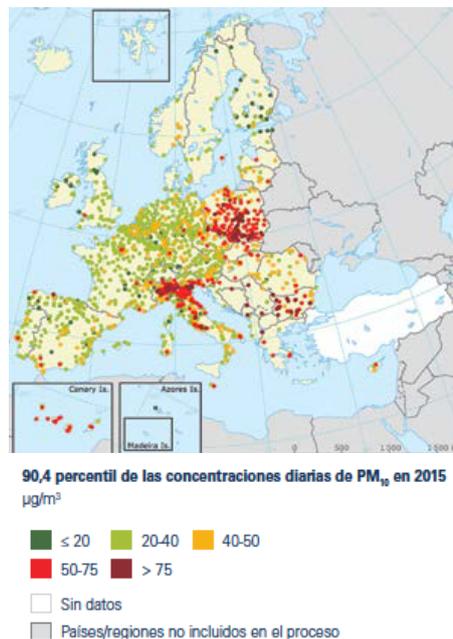


Imagen 2. Concentraciones diarias de PM10 en valor límite diario en 2015 en Europa.

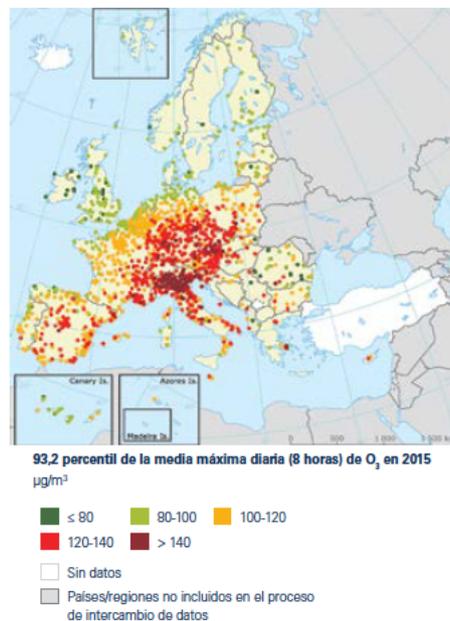
Fuente: "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial", Naturgy

Como ocurría en el apartado anterior con el dióxido de nitrógeno, la localización de las estaciones con problemas demuestra que los problemas que presenta la Unión Europea en cuanto a este contaminante son escalables a España. También indican

que las principales causas son el tráfico, los procesos de combustión y los procesos industriales.

### Ozono (O<sub>3</sub>)

En cuanto a las emisiones de ozono generadas en 2015 en Europa, el informe muestra que 18 de los estados miembros y 4 de los países que han cedido sus datos superaron el valor límite de ozono más de 25 veces. Este hecho significó que el 41% de las estaciones presentaron niveles de concentración superiores del valor de protección de salud en 2015. La localización de las estaciones que sobrepasan el límite demuestra que debe ser considerado como un problema general a nivel europeo, teniendo en cuenta que los países que presentan mayores problemas son los del sur de Europa, como se puede observar en la imagen 3, debido a su clima y a la elevada insolación que reciben.



*Imagen 3. Concentración de ozono en valor diario en Europa en 2015*  
Fuente: "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial", Naturgy

A pesar de que durante los últimos años los gobiernos han llevado a cabo importantes medidas con el fin de minimizar las emisiones de gases contaminantes, todavía existen determinados problemas en cuanto a la calidad del aire cuya solución debe ser prioritaria para las diferentes administraciones públicas.

Así, se puede concluir que, tanto a nivel nacional como europeo, los principales problemas respecto a la calidad del aire del ambiente están directamente relacionados con las partículas en suspensión PM<sub>10</sub> y con el dióxido de nitrógeno,

los cuales se concentran en zonas urbanas y suburbanas, y cuya fuente principal de emisión es el tráfico.

## 2.3 Causas y origen de la contaminación del aire en España

Una vez presentados los problemas en España y en Europa de manera superficial, en este apartado se van a presentar cuáles son las causas de la contaminación en España qué factores son los responsables de una mala calidad del aire urbano.

Durante los últimos 25 años, en España, los niveles de calidad del aire y las emisiones han mejorado sustancialmente para los óxidos de nitrógeno, como se puede apreciar en la imagen 4. Aún así, los problemas principales que todavía existen están asociados a zonas urbanas.

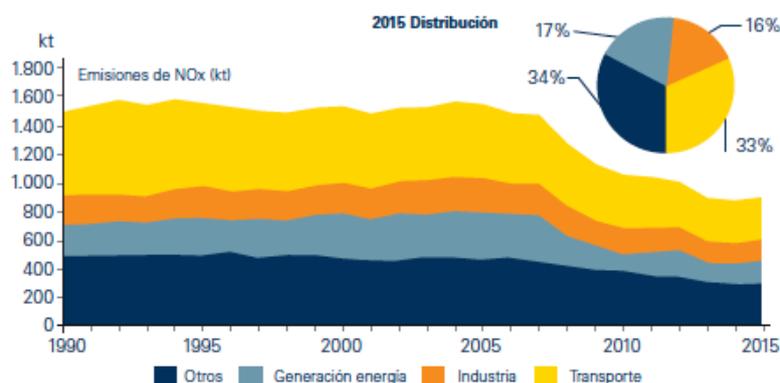


Imagen 4. Evolución de las emisiones de óxidos de nitrógeno en España entre 1990 y 2015.  
Fuente: "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial", Naturgy

En cuanto a las partículas en suspensión, en el informe de 2017 de la Agencia Europea de Medio Ambiente se aprecia que España se encuentra, en valores del año 2015, por debajo de la mediana de la Unión Europea en cuanto a concentración de PM10 con relación al límite diario y también respecto al indicador de exposición de PM2,5 de la población.

Con el fin de mejorar la calidad del aire en las ciudades, primeramente, se debe determinar cuáles son las principales fuentes causantes del problema, la contaminación. En cuanto a las emisiones de gases contaminantes, una vez obtenido un inventario de emisiones, el procedimiento a seguir es bien sencillo, ya que sólo consiste en realizar un análisis de los datos ordenando las distintas fuentes dependiendo de cuántos contaminantes ha emitido cada una.

No obstante, el proceso de identificación de los sectores o actividades que provocan una mala calidad del aire ambiente no es inmediato. Aparte de conocer las propias emisiones para poder interpretar los diferentes niveles contaminación en el ambiente, se necesita conocer varios factores más, como la distancia que hay hasta la población, la altura de las emisiones y los procesos de transformación y dispersión que ocurren en la atmósfera. Para eso, es necesario aplicar diferentes técnicas que puedan evaluar el potencial impacto de la concentración de emisiones respecto a los procesos mencionados. Estas técnicas pueden ser de distintos tipos, entre los que destaca la modelización y caracterización del transporte físico y de las reacciones químicas de los gases contaminantes sobre la atmósfera (Borge et al. 2014) teniendo en cuenta la localización de los diferentes focos contaminantes, el efecto que tienen las variables meteorológicas y las interacciones entre unas sustancias y otras. Un gran ejemplo de este tipo de modelos, es el que ha realizado el ayuntamiento de Madrid en su plan de calidad del aire y contra el cambio climático, denominado Plan A (Ayuntamiento de Madrid 2017), como se puede observar en la imagen 5, en la que se muestran las diferentes fuentes de contaminantes de dióxido de nitrógeno, y en la imagen 6, en la que se observan las fuentes contaminantes de partículas PM<sub>2,5</sub> de media en Madrid.

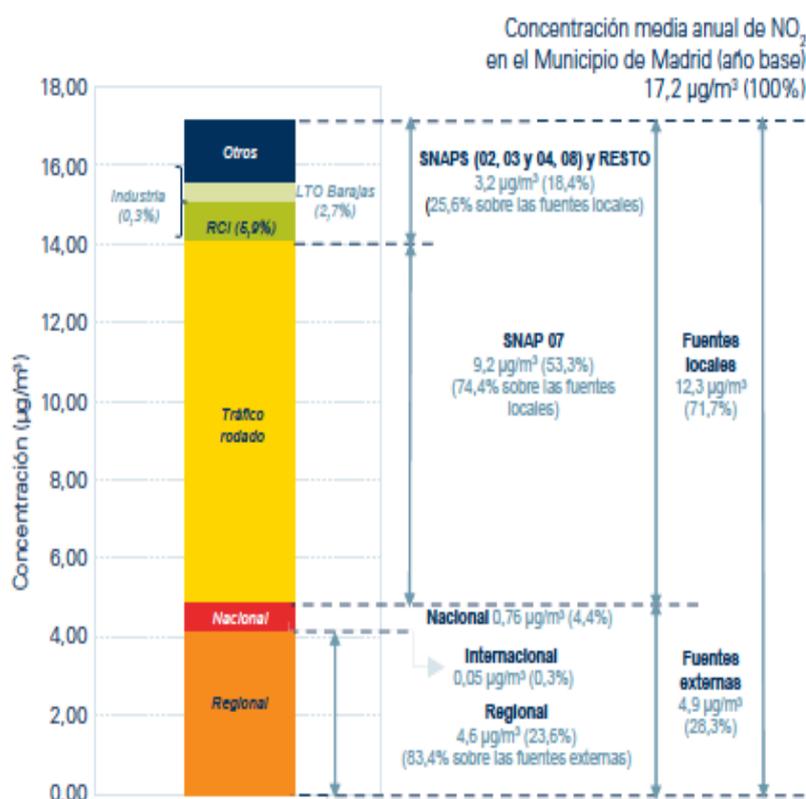


Imagen 5. Concentración media anual de dióxido de nitrógeno en el municipio de Madrid por fuente de contaminación

Fuente: "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial", Naturgy

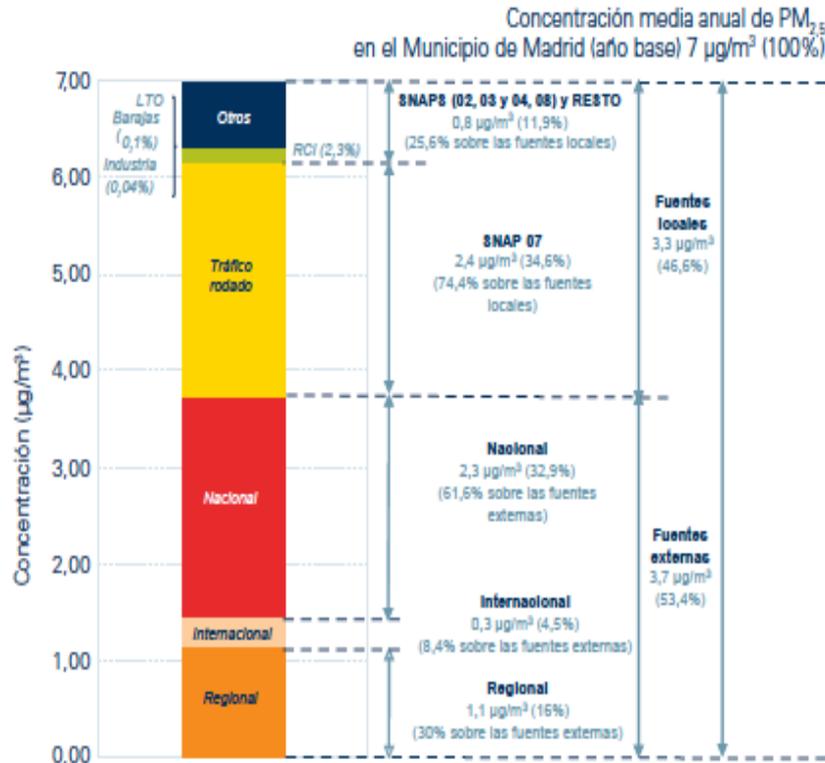


Imagen 6. Concentración media anual de partículas  $PM_{2,5}$  en el municipio de Madrid por fuente de contaminación

Fuente: "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial", Naturgy

Como se puede observar en ambas imágenes, el tráfico rodado supone un 74,4% de las emisiones sobre las fuentes locales para ambos contaminantes.

A pesar de que la situación en la ciudad de Madrid no ha de ser extrapolable al resto de ciudades, existen otros estudios que también demuestran que, dentro del ámbito urbano, los sectores principales que favorecen a que existan altas concentraciones de contaminantes en la atmósfera son el tráfico y el sector RCI (Residencial, Comercial e Institucional). A su vez, en algunas ciudades, es también especialmente relevante la aportación de la industria.

Como se ha comentado anteriormente, la gestión para una buena calidad del aire es especialmente compleja. Dicha dificultad se ve afectada por los factores que se presentan a continuación:

- **Interrelaciones entre múltiples gases contaminantes:** el impacto que provoca la contaminación sobre las personas, los diferentes ecosistemas y el

clima se debe principalmente a los múltiples gases contaminantes presentes en el aire y a sus reacciones entre ellos, las cuales pueden ser sinérgicas o antagónicas. Un claro ejemplo es la reacción entre dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, la cual provoca problemas de acidificación y a su vez produce un efecto de enfriamiento del aire, dado que se generan unas partículas secundarias capaces de dispersar la radiación.

- **Múltiples escalas:** la concentración de gases contaminantes que se mide en un punto determinado es combinación de diferentes fuentes de contaminación y procesos, los cuales pueden estar ubicados a cientos de kilómetros (como procesos industriales a las afueras de las ciudades) o a varios metros (como la contaminación producida por un vehículo circulando cerca del aparato de medición).
- **Múltiples y diversas fuentes de emisiones:** además de las diversas ubicaciones donde se pueden emitir contaminantes, el tipo de fuentes también difiere (transporte, sector RCI, industrias...). No obstante, el transporte es la principal fuente que contribuye a los niveles de gases contaminantes por dos motivos: primero, por el enorme volumen de emisiones que produce, y segundo, porque la emisión se realiza a nivel de suelo, lo cual provoca que esté mas cerca de la altura a la que se produce la respiración de los habitantes, por lo cual influye directamente en su salud.
- **Gran complejidad del sector del tráfico rodado:** dado el gran peso que tiene el tráfico rodado sobre el total de emisiones en el aire, es imprescindible realizar un buen modelo para intentar reducir dichos contaminantes. Sin embargo, este modelado es muy complicado, dado que un vehículo es capaz de producir distintas emisiones según la velocidad a la que circule, el estilo de conducción del conductor o el nivel de congestión de la vía en la que se encuentre. Así, para realizar el modelado de emisiones debidas al transporte habría que definir el comportamiento individual de cada vehículo mediante modelos de simulación del tráfico a una microescala, lo cual es sumamente complicado.
- **Grandes gradientes espaciotemporales:** existen diferencias de concentración en un mismo punto debido a la presencia de obstáculos artificiales como edificios, a la circulación del aire e incluso a la diversidad de fuentes de emisiones, las cuales pueden llegar a presentar diferencias hasta del 50% en un espacio con un radio de 10 metros para contaminantes como el dióxido de nitrógeno.

- **Gran influencia de las distintas condiciones meteorológicas:** condiciones meteorológicas adversas pueden obstaculizar la ventilación de aire en las ciudades (como ha ocurrido en Madrid recientemente), lo cual conlleva la permanencia de los contaminantes, ante las que se activan los episodios de alta contaminación. Ante la falta de ventilación y la presencia de altos niveles de contaminantes, la efectividad de las potenciales medidas a adoptar para reducirlos es limitada.

En definitiva, cuando se quiere desarrollar un paquete de medidas para reducir las emisiones con el fin de mejorar la calidad del aire, se deben tener en cuenta los factores planteados anteriormente, los cuales presentan numerosas limitaciones.

## 2.4 Emisiones contaminantes en vehículos

Una vez habiendo identificado que el transporte es la mayor fuente de emisiones contaminantes en ciudades, en este apartado se va a tratar de explicar qué vehículos se incluyen en las regulaciones de contaminantes y qué tipo de contaminantes son considerados.

Con el fin de reducir al máximo el impacto del transporte sobre el medio ambiente, la Unión Europea ha establecido las directivas en las que se presentan las limitaciones de las emisiones de gases contaminantes que provienen de los vehículos, realizando una división de los vehículos por categorías, las cuales se muestran en la siguiente tabla (así como los procesos de homologación que deben pasar, los cuales certifican que cumplen las normas determinadas en las directivas de emisiones):

<b>TIPO</b>	<b>CATEGORÍA</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>MODO</b>	<b>CICLO</b>
Turismos	M1	< 10 pasajeros	Banco rodillos	WHLC
Furgonetas	N1 CL1	< 1.305 kg		
	N1 CL2	1.305 – 1.760 kg		
	N1 CL3	1.760 – 3.500 kg		
Autobuses	M2	< 5.000 kg	Banco motor	WHSC y WHTC
	M3	> 5.000 kg		
Camiones	N2	3.500 – 12.000 kg		
	N3	> 12.000 kg		
Ciclomotores	L1	< 50 cm <sup>3</sup>	Banco rodillos	ECE 347
Motos 2 ruedas	L3, L4	2 ruedas		WMTC
Motos 3 ruedas	L5	3 ruedas		
Quads	L6, L7	3-4 ruedas		WMTC, ECE R40 y R47

*Tabla 1. Clasificación de los vehículos de carretera en Europa*

*Fuente: Elaboración propia*

Los vehículos M1, N1 y todos los L son considerados vehículos ligeros, cuya homologación se lleva a cabo sobre el modelo de un vehículo completo y los gases que emite a través del tubo de escape son medidos en un banco de rodillos, en el cual se hace al vehículo circular como si estuviera circulando en carretera, seguido de un ciclo de conducción que se encuentre definido por la regulación que le afecte.

Por otro lado, en el caso de los vehículos pesados, los cuales están compuestos por los camiones y autobuses, se certifica que cumplen con la regulación únicamente las emisiones del motor. En este caso, se ensaya el motor en un banco de pruebas donde se decide si se homologa para después instalarse en autobuses y camiones.

En cuanto al proceso de homologación, en septiembre de 2017 se ha aprobado un nuevo ciclo de homologación de consumos, el Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP, del que se hablará más en detalle en el apartado 3.1), con el cual se pretende controlar con mayor rigor el consumo y las emisiones reales de los vehículos, ya que con el procedimiento anterior los consumos y emisiones reales diferían mucho de los que aparecían durante el ensayo. Previamente, existían distintas pruebas de homologación en diferentes regiones del mundo (Europa, EE. UU., Australia, Japón...). La finalidad del ciclo WLTP es crear un test global para todas las regiones con el fin de poder comparar consumos y emisiones a nivel mundial con mayor facilidad (Ramos 2017).

Por otro lado, los automóviles emiten a la atmósfera partículas contaminantes a través de tres vías distintas:

- Evaporación de las partes más volátiles de los combustibles de los automóviles, como la gasolina, los alcoholes, el gas natural o el gas licuado del petróleo.
- Sustancias que se encuentran en los gases de escape debidos a una combustión completa aparte del dióxido de carbono y del vapor de agua.
- Sustancias sólidas que provienen del desgaste de componentes propios del vehículo, como pueden ser pastillas de los discos de freno, embrague o neumáticos. Hoy en día, estas emisiones no están reguladas en ninguna región del mundo. Sin embargo, según las tendencias vayan girando hacia la compra de coches eléctricos y se reduzcan al máximo los dos anteriores tipos de contaminantes, este pasará a ser el tipo más importante.

Además, algunos gases contaminantes producidos en los gases de escape se producen debido a una combustión incompleta, como puede ser el caso del monóxido de carbono y diferentes hidrocarburos, mientras que, a su vez, los óxidos de nitrógeno proceden de una buena combustión.

Por otro lado, el metano emitido en los gases de escape de los motores no es considerado como un gas contaminante en muchas normativas, ya que éstas únicamente limitan la emisión de hidrocarburos sin incluir el metano, como los hidrocarburos no-metánicos o los gases orgánicos no-metánicos. Las partículas PM provienen especialmente del hollín y de algunos hidrocarburos líquidos. Además, se puede emitir dióxido de azufre, plomo, u otros metales si el propio combustible a utilizar los lleva en su formulación. Sin embargo, actualmente su contenido está limitado en los combustibles que se venden en las estaciones de servicio.

Por otra parte, el dióxido de carbono no es considerado un gas contaminante, pero sí es considerado como un gas de efecto invernadero. Éste aparece en la reacción de combustión de los hidrocarburos. El metano o el anhídrido nitroso, también gases de efecto invernadero, son emitidos por los automóviles, lo único que son emitidos en cantidades muy pequeñas, por lo que su efecto no es significativo.

Seguidamente, se presenta un pequeño resumen de los fenómenos que ayudan a la aparición de componentes no deseados en los gases de escape debidos a los procesos de combustión:

- **Monóxido de carbono:** este material se genera químicamente en el proceso de la combustión y post combustión como consecuencia de la falta de oxidación del carbono a dióxido de carbono. Así, cuando la mezcla es rica, es decir, le falta oxígeno, se emite en cantidades abundantes. Además, también se emite si la mezcla es pobre o estequiométrica debido a la lenta cinética del monóxido de carbono al reducirse la temperatura durante la expansión de los gases y no conseguirse el equilibrio químico de la reacción  $\text{CO} + \text{O}_2$  que da lugar a  $\text{CO}_2$ .
- **Óxidos de nitrógeno:** en un proceso de combustión a alta temperatura, se genera monóxido de nitrógeno debido a la reacción entre el nitrógeno y el oxígeno. Este tipo de reacción es considerado de cinética lenta, por lo cual la concentración depende del tiempo que permanecen los gases a altas temperaturas, además de su enfriamiento dentro de la cámara. Por otro lado, es necesaria la presencia de oxígeno, por lo cual motores que utilizan gasolina con mezclas ricas o estequiométricas emiten menos monóxido de nitrógeno que los motores diésel, los cuales utilizan un exceso de oxígeno con una temperatura mayor de combustión. Después, el monóxido de nitrógeno

se oxida a dióxido de nitrógeno al salir a la atmósfera. Por otra parte, si existe oxígeno en los gases que salen del motor, una parte del monóxido de nitrógeno se oxida a dióxido de nitrógeno dentro del sistema de escape, generando una mezcla que se denomina óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Por eso la existencia de un catalizador de oxidación en los sistemas de escape de los motores diésel, empeora el problema en este tipo de motores.

- **Partículas en suspensión (PM):** estas partículas que proceden del hollín se forman por la nucleación en distintas zonas de la cámara de combustión en las que exista combustible a altas temperaturas con ausencia de oxígeno. Este hecho suele ocurrir en motores diésel en la llama de difusión y, aunque con menor frecuencia, en motores de gasolina de mezcla estratificada. Las partículas nanométricas generadas van haciéndose más grandes y uniéndose con otras iguales por aglomeración. Después adsorben hidrocarburos con alto peso molecular condensados, una vez va bajando la temperatura de escape. El tamaño de dichas partículas está relacionado con el fenómeno de atomización del combustible, el cual depende de la viscosidad y de la presión de inyección del combustible.
- **Hidrocarburos:** los hidrocarburos que se generan en los gases de escape se deben a los del combustible por apagado de la llama o porque existen partes en la cámara de combustión a los que la llama no consigue llegar, llamadas resquicios. Los resquicios o las partes de la pared frías favorecen su aparición. Sin embargo, una parte de estos hidrocarburos puede oxidarse parcialmente en las etapas sucesivas del proceso. Por otra parte, también pueden aparecer hidrocarburos por degradación del combustible en áreas donde la temperatura sea muy elevada sin oxígeno, especialmente en motores que operen con combustibles diésel.

## 2.5 Estado del aire en Madrid

Una vez mostrado cuál es la situación de la calidad del aire en Europa y en España, en este apartado se va a mostrar cuál es el estado de la calidad del aire del municipio de Madrid. Primeramente, se mostrará cómo se realiza la medición de la calidad del aire de Madrid, para después, mostrar cuáles son los contaminantes más preocupantes y en qué niveles se encuentran dichos contaminantes. Finalmente, se explicará cuál es la situación global del aire de Madrid. Para ello, se utilizará el informe de Ecologistas en acción llamado “Calidad del aire en la ciudad de Madrid durante 2018”(García 2018).

El municipio de Madrid cuenta con una red de medición de 24 estaciones, que se clasifican en tres tipos diferentes, según el ambiente donde se encuentren: existen 12 estaciones de fondo urbano (en zonas alejadas de los vehículos como parques, o en calles con poco tráfico), 9 estaciones de tráfico (cerca de las vías de circulación) y 3 estaciones suburbanas (ubicadas fuera de la zona urbana de la ciudad de Madrid). Además, hay que tener en cuenta que no se miden todos los contaminantes en todas las estaciones de la red. De esta manera, cada contaminante únicamente se evalúa en un subconjunto de todas las estaciones de medida. De esta forma, para los contaminantes a tener en cuenta se observa que: el dióxido de nitrógeno se evalúa en todas las estaciones de medida, las partículas en suspensión PM10 se miden en 13 estaciones, las partículas en suspensión PM2,5 se miden en 7 de las 13 que miden PM10 y el ozono se evalúa en 14 estaciones. En la siguiente tabla se muestran las 24 estaciones de medida de la ciudad de Madrid, así como sus características y en la zona que se encuentran:

ZONA	ESTACIÓN	TIPO	DISTRITO	NO2	PM10	PM2,5	O3
1	Plaza de España	Tráfico	Moncloa	Sí			
	Esc. Aguirre	Tráfico	Salamanca	Sí	Sí	Sí	Sí
	Ramón y Cajal	Tráfico	Chamartín	Sí			
	Cuatro Caminos	Tráfico	Chamberí	Sí	Sí	Sí	
	Barrio del Pilar	Tráfico	Fuencarral	Sí			Sí
	Castellana	Tráfico	Chamartín	Sí	Sí	Sí	
	Plaza Castilla	Tráfico	Tetuán	Sí	Sí	Sí	
	Pza. del Carmen	FU	Centro	Sí			Sí
	Méndez Álvaro	FU	Arganzuela	Sí	Sí	Sí	
	Retiro	FU	Retiro	Sí			Sí
2	Moratalaz	Tráfico	Moratalaz	Sí	Sí		
	Vallecas	FU	Pte. Vallecas	Sí	Sí		
	Ens. Vallecas	FU	Villa Vallecas	Sí			Sí
3	Arturo Soria	FU	Ciudad Lineal	Sí			Sí
	Barajas Pueblo	FU	Barajas	Sí			Sí
	Urb. Embajada	FU	Barajas	Sí	Sí		
	Sanchinarro	FU	Hortaleza	Sí	Sí		
	Tres Olivos	FU	Fuencarral	Sí	Sí		Sí
	Juan Carlos I	Sub	Barajas	Sí			Sí
4	Casa Campo	Sub	Moncloa	Sí	Sí	Sí	Sí
	El Pardo	Sub	Fuencarral	Sí			Sí
5	Fdez. Ladreda	Tráfico	Usera	Sí	Sí	Sí	Sí
	Villaverde	FU	Villaverde	Sí			Sí
	Farolillo	FU	Carabanchel	Sí	Sí		Sí

Tabla 2. Estaciones de medida de la calidad del aire de Madrid

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se muestra una columna con el nombre “Zona”. Esto se debe a que el Ayuntamiento de Madrid ha dividido la ciudad en zonas, con el fin de gestionar situaciones en las que existan altos niveles de gases contaminantes, los cuales implican la activación del protocolo de actuación llevado a cabo por el propio Ayuntamiento. Además, en la imagen siguiente se muestran las 24 estaciones situadas sobre el mapa, mostrándose en color verde las estaciones suburbanas, en rojo las estaciones de tráfico y en azul las estaciones de fondo urbano. Así, las diferentes zonas de Madrid son:

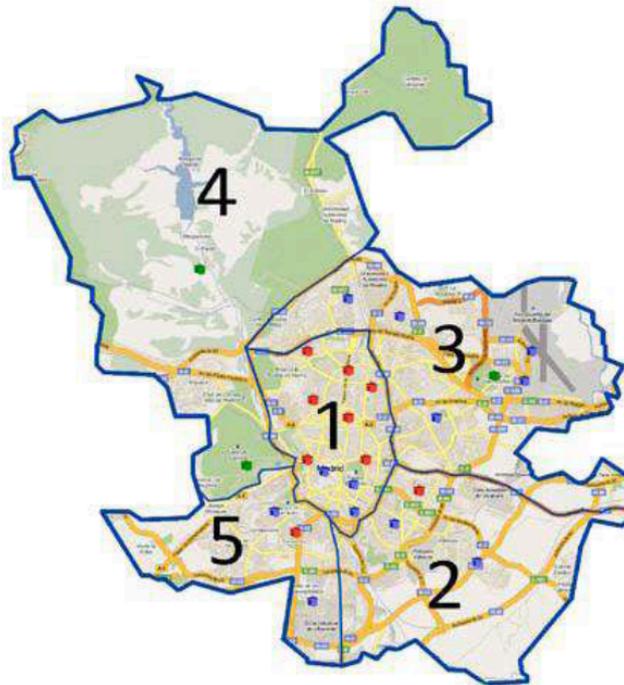


Imagen 7. División por zonas del municipio de Madrid y ubicación de las 24 estaciones de medida

Fuente: “La calidad del aire en la ciudad de Madrid en 2018”. Ecologistas en acción

En cuanto a los principales contaminantes a considerar en la ciudad de Madrid, se consideran el dióxido de nitrógeno, las partículas en suspensión PM10 y PM2,5 y el ozono.

### Dióxido de nitrógeno

Como se ha mencionado previamente, la presencia de dióxido de nitrógeno en las ciudades es debida principalmente a los motores de combustión que utilizan diésel

como combustible. Por ello, la existencia de dióxido de nitrógeno es un buen indicador de la contaminación del aire que es debida al transporte rodado.

Los óxidos de nitrógeno son muy reactivos en general, afectando a las zonas más profundas de los pulmones al inhalarlo, lo cual inhibe algunas de sus funciones, como su respuesta inmunológica, lo que puede hacer que disminuya la resistencia que oponen frente a infecciones. Además, el hecho de estar expuesto a altas concentraciones de dióxido de nitrógeno a largo plazo ha sido asociado con un aumento de enfermedades respiratorias crónicas, además de una reducción de la capacidad pulmonar.

La Unión Europea establece dos tipos de valores límites para casos de contaminación por dióxido de nitrógeno, que son un valor límite anual, el cual se ha fijado en 40 micras por metro cúbico de concentración media anual, y un valor límite horario, fijado en 200 micras por metro cúbico, el cual no debe superarse durante más de 18 horas al año en ninguna estación de medida.

En Madrid durante 2018, 7 estaciones superaron el valor límite anual, como se puede observar en la tabla 3, donde se puede ver que las estaciones con mayores valores de concentración media anual son Escuelas Aguirre y Fernández Ladreda. Por otro lado, las estaciones con menores valores se grabaron en parques y áreas naturales cercanas a la ciudad, como pueden ser las estaciones de El Pardo, Casa de Campo y el parque Juan Carlos I. En cuanto al valor medio anual de todas las estaciones, durante 2018 se ha obtenido un valor de 37 micras por metro cúbico, inferior al límite fijado por la Unión Europea, lo cual supone una gran mejora respecto a años anteriores, siendo el tercer valor más bajo de los últimos 8 años y el mejor de los últimos cuatro.

Además, durante 2018, sólo 7 estaciones superaron el valor límite anual, siendo menos de la mitad que las 15 estaciones que lo superaron en 2017 y siendo el segundo valor más bajo en los últimos nueve años (en 2014 lo superaron 6 estaciones).

Por otro lado, en cuanto al valor límite horario, como se puede observar en la tabla 3, únicamente 2 estaciones superaron este límite, que fueron Fernández Ladreda y Ramón y Cajal, siendo estas 2 estaciones el menor número de estaciones que sobrepasa el límite de las 18 horas en los últimos nueve años (en 2012 y 2013 hubo 3 estaciones que lo superaron). Además, el número total de veces que se ha superado el valor límite horario ha sido 102, el menor valor de los últimos nueve años de largo (siendo el segundo menor valor 158 en 2013 y el máximo 554 en 2015).

ESTACIÓN	TIPO	Media Anual ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Nº de superaciones del valor límite horario ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Esc. Aguirre	Tráfico	55	5
Fdez. Ladreda	Tráfico	53	33
Pza. del Carmen	FU	45	0
Pza. de España	Tráfico	43	2
Ramón y Cajal	Tráfico	43	24
Cuatro Caminos	Tráfico	42	11
Urb. Embajada	FU	41	1
Pza. Castilla	Tráfico	40	2
Castellana	Tráfico	39	1
Moratalaz	Tráfico	39	0
Barrio del Pilar	Tráfico	39	13
Ens. Vallecas	FU	37	4
Vallecas	FU	37	0
Villaverde	FU	37	0
Arturo Soria	FU	37	1
Barajas Pueblo	FU	36	1
Méndez Álvaro	FU	35	0
Farolillo	FU	34	0
Sanchinarro	FU	31	3
Retiro	FU	29	0
Tres Olivos	FU	28	0
Juan Carlos I	Sub	25	1
Casa Campo	Sub	20	0
El Pardo	Sub	15	0
Media RED		37	0

Tabla 3. Mediciones de dióxido de nitrógeno en las 24 estaciones de medida de Madrid en 2018  
Fuente: "La calidad del aire en la ciudad de Madrid en 2018". Ecologistas en acción

Estos buenos datos se han conseguido principalmente por las favorables condiciones meteorológicas que han tenido lugar sobre Madrid, a pesar de que durante el mes de diciembre de 2018 se tuvieron que activar hasta en cuatro ocasiones el protocolo de actuación por las más que desfavorables condiciones meteorológicas, cuyas condiciones dieron lugar a que se superara 47 veces el valor límite horario, casi la mitad de las 102 veces que se ha superado durante todo el año 2018. Por otro lado, no se puede descartar el hecho de que las medidas de limitación de tráfico llevadas a cabo por el Ayuntamiento que presidía Manuela Carmena haya ayudado a conseguir estos buenos resultados. A pesar de éstos, Madrid ha vuelto a vulnerar los valores límites legales impuestos por la directiva 2008/50/CE (y ya van nueve años seguidos), los cuales no debían superarse desde 2010.

## **Partículas en suspensión (PM10 y PM2,5)**

Se consideran partículas en suspensión a sustancias orgánicas o inorgánicas dispersas en el aire, que pueden proceder de fuentes artificiales (motores de combustión) o naturales (polvo africano). Dentro de este gran grupo de partículas se suelen diferenciar tres tipos: partículas PM10 (de tamaño menor a 10 micras, las cuales pueden llegar a las vías respiratorias bajas), partículas PM2,5 (de tamaño menor a 2,5 micras, que pueden llegar hasta zonas donde se produce el intercambio de gases dentro del pulmón) y partículas ultrafinas (menores de 0,1 micras, que pueden llegar a entrar en el torrente sanguíneo).

Diferentes estudios muestran que estas partículas tienen gravísimos efectos sobre la salud de las personas, desde ingresos hospitalarios por afecciones respiratorias y cardiovasculares hasta mortalidad por cáncer de pulmón. A largo plazo, se ha estimado que la exposición a este tipo de partículas puede disminuir la esperanza de vida entre varios meses y dos años (la OMS estima que los europeos pierden 8,6 meses de esperanza de vida por la exposición a las partículas PM2,5).

La OMS, con el fin de proteger la salud humana, recomienda que no se superen las 20 micras por metro cúbico de valor medio anual. Sin embargo, el valor límite anual fijado por la Unión Europea es de 40 micras por metro cúbico en cuanto a concentración media anual, los cuales no se deben sobrepasar desde el año 2005.

Los datos de Madrid durante 2018, que se pueden ver en la tabla 4, muestran que ninguna estación supera el valor límite establecido de PM10. Sin embargo, 4 estaciones de las 13 que miden estas partículas superan el valor recomendado por la OMS. Sin embargo, tres de ellas lo hacen muy levemente y el valor medio de la red (18 micras por metro cúbico) no supera el valor recomendado por la OMS.

Estación	Tipo	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
		Media anual (µg/m <sup>3</sup> )	Media anual (µg/m <sup>3</sup> )
Fdez. Ladreda	Tráfico	23	13
Esc. Aguirre	Tráfico	21	11
Moratalaz	Tráfico	21	
Urb. Embajada	FU	21	
Cuatro Caminos	Tráfico	19	10
Vallecas	FU	18	
Farolillo	FU	18	
Tres Olivos	FU	18	
Pza. Castilla	Tráfico	17	10
Sanchinarro	FU	17	
Méndez Álvaro	FU	16	10
Castellana	Tráfico	16	10
Casa Campo	Sub	15	8
Media RED		18	10

FU: estaciones de fondo urbano; Sub: estaciones suburbanas.  
Se indican con fondo gris los registros que igualan o superan los valores recomendados por la OMS.

Tabla 4. Número de veces que se ha superado el límite establecido por la OMS de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> en Madrid en 2018 por estaciones

Fuente: "La calidad del aire en la ciudad de Madrid en 2018". Ecologistas en acción

Además, los datos recogidos durante 2018 suponen el mejor valor de los últimos años, teniendo el valor medio de toda la red menor y el valor máximo más bajo.

Por otro lado, en cuanto a las partículas PM<sub>2,5</sub>, los límites permitidos son más restrictivos debido a que son más dañinas para la salud. Así, la legislación europea limita a 25 micras por metro cúbico, mientras que la OMS establece su límite en 10 micras por metro cúbico. En la tabla 4 se puede observar que durante 2018 ninguna estación superó el límite legal, mientras que 2 estaciones sobrepasaron el valor que recomienda la OMS. Respecto a la evolución de este tipo de partículas durante los últimos años, se puede observar que existe una tendencia a la baja de partículas PM<sub>2,5</sub>.

## Ozono

El ozono es considerado un agente oxidante potente, generado por una serie de reacciones químicas compleja, en las cuales actúa la radiación solar principalmente, además de compuestos orgánicos volátiles y dióxido de nitrógeno, entre otros. Este carácter oxidante ha causado numerosos efectos adversos sobre la salud humana. Sin embargo, la respuesta del cuerpo ante la presencia de ozono difiere según razones genéticas y edad, además de perjudicar afecciones respiratorias como el

asma o alergias. Varios estudios asocian el ozono a inflamaciones de pulmón, síntomas respiratorios e incluso incrementos de mortalidad.

Actualmente, la Unión Europea determina que el valor límite de ozono no debe superar las 120 micras por metro cúbico, el cual no se puede superar en periodos de ocho horas ni más de 25 días al año en promedio durante un periodo de tres años. Además, la OMS determina valores más restrictivos incluso, estableciendo este límite en 100 micras por metro cúbico.

En Madrid durante el año 2018, como se puede observar en la tabla 5, 6 estaciones de las 14 que miden la contaminación por ozono superaron más de 25 veces el límite legal octohorario. Respecto al valor recomendado por la OMS, 13 de las 14 estaciones superaron ampliamente estas 25 veces el valor límite octohorario.

ESTACIÓN	TIPO	Nº superac. valor recom. OMS octohorario (100 µg/m³)	Nº superac valor límite legal octohorario (120 µg/m³)	Nº superac Umbral de información horario (180 µg/m³)
El Pardo	Sub	123	63	5
Casa Campo	Sub	136	63	0
Tres Olivos	FU	134	60	1
Juan Carlos I	Sub	111	50	1
Barajas Pueblo	FU	95	31	0
Barrio del Pilar	Tráfico	93	29	0
Farolillo	FU	90	25	0
Villaverde	FU	81	25	0
Arturo Soria	FU	69	21	0
Ens. Vallecas	FU	88	20	0
Esc. Aguirre	Tráfico	70	13	0
Retiro	FU	81	11	0
Fdez. Ladreda	Tráfico	41	4	0
Pza. del Carmen	FU	22	3	0
Media RED		90	21	0

FU: estaciones de fondo urbano; Sub: estaciones suburbanas.  
Se indican con fondo negro los registros que igualan o superan valores límite legales y con fondo gris los registros que superan valores recomendados por la OMS.

Tabla 5. Número de veces que se han superado los límites legales y recomendados por la OMS de ozono en Madrid en 2018

Fuente: "La calidad del aire en la ciudad de Madrid en 2018". Ecologistas en acción

Además, la Unión Europea determina que, en caso de que en algún momento la concentración de ozono supere las 180 micras por metro cúbico durante una hora, se debe informar a la población, así como de avisar de un umbral de alerta si se superan las 240 micras por metro cúbico durante una hora también. En ese caso, la

administración está obligada a comunicar a avisar a la población sobre previsiones y recomendaciones de medidas de protección a llevar a cabo. Así, durante 2018 en Madrid, en 3 estaciones de las 14 se superó el límite de información a la población.

Por otro lado, los valores más altos de ozono en Madrid se encontraron en estaciones suburbanas y de fondo urbano, dado que, aunque los precursores del ozono se emitan en zonas con tráfico, el ozono se suele ver implicado en fenómenos de transporte atmosférico. Así, los niveles de ozono en cada región tienen una gran dependencia con el régimen de vientos que haya predominado durante dicho año.

En comparación con otros años, los niveles de ozono que se registraron en 2018 son similares a los registrados en los últimos años, lo cual puede estar asociado al proceso de cambio climático que está sufriendo el mundo.

## Conclusiones

Como se ha comentado previamente, durante el año 2018 en Madrid se ha registrado un gran descenso en la contaminación del aire, principalmente en los niveles de dióxido de nitrógeno y de partículas en suspensión, comparado con años anteriores. Esta reducción ha sido provocada por las favorables condiciones meteorológicas que ha sufrido Madrid, aunque medidas como Madrid Central y los protocolos de contaminación han ayudado también, aunque en menor medida. Aún así, varios límites legales establecidos se siguen sobrepasando, como lleva ocurriendo desde el año 2000, si bien es cierto que desde el año 2008 se viene observando un descenso moderado de los niveles de contaminación en Madrid debido a la reducción del transporte y del consumo de combustibles provocados por la crisis económica. A pesar de ello, esta reducción no ha bastado para conseguir una correcta calidad del aire con relación a los límites legales, ni respecto a los límites de protección de la salud recomendados por la OMS. Sin embargo, una buena calidad del aire sufre una gran dependencia de los factores meteorológicos (como en los años 2015 o 2017). Para que aumenten agresivamente los niveles de dióxido de nitrógeno o de ozono, es suficiente que se produzcan una serie de factores meteorológicos (como veranos extremadamente calurosos o anticiclones en otoño-invierno), que por otro lado es esperable que sigan ocurriendo en los próximos años debido al cambio climático. Así, se puede concluir que la calidad del aire depende de la situación económica y de las condiciones meteorológicas.

Por otro lado, hay que remarcar que la renovación del parque de vehículos no ha sido tan eficaz como se esperaba en cuanto a la reducción de la concentración de contaminantes, como se ha visto con el dióxido de nitrógeno. Dado que la principal fuente de contaminación en Madrid es el transporte rodado, con el fin de no depender de la meteorología para disfrutar de una buena calidad del aire, para disminuir las concentraciones de contaminantes hay que atacar al parque de

vehículos, tanto modificándolo como reduciéndolo. La reducción de automóviles en el centro de las ciudades es bastante común, aplicando diversas medidas que se mostrarán más adelante.

El problema de la ciudad de Madrid es el gobierno bajo el que se rige en cada momento. Hasta el año 2015 se sucedieron varios gobiernos del Partido Popular, los cuales se han caracterizado por una persistente inacción por mejorar la calidad del aire de los ciudadanos. Estos gobiernos directamente se negaron a reconocer que existía un problema y nunca valoraron la posibilidad de llevar a cabo medidas para reducir el tráfico en la ciudad, a pesar de que otras grandes ciudades de Europa ya lo hacían.

Así, en 2015, con la llegada de Ahora Madrid al ayuntamiento liderado por Manuela Carmena, comenzó su legislatura mostrando un enfoque distinto sobre el problema de la contaminación en Madrid, reconociendo que existe un problema para la salud pública y que la principal fuente de contaminación es el transporte, para lo cual habían de desarrollar medidas drásticas, ya que llevaban 10 años de desventaja respecto al resto de Europa. De esta manera, en enero de 2016, el ayuntamiento aprobó el primer protocolo de actuación frente a episodios de alta contaminación. Las primeras aplicaciones de este protocolo sirvieron para visibilizar un problema que llevaba existiendo varios años atrás, aunque nunca antes se haya hecho nada para reducirlo o evitarlo. Además, la aplicación de este protocolo tuvo una gran acogida entre los ciudadanos en gran parte, los cuales se sensibilizaron con el problema y mostraron una agradable predisposición a realizar cambios que mejoren la calidad del aire, aunque ello suponga realizar determinados sacrificios. Aunque en el año 2016 sí se consiguieron buenos resultados debido a este protocolo, las malas condiciones meteorológicas de 2017 mostraron que esta versión del protocolo no era suficiente para que Madrid no incumpla el límite horario de dióxido de nitrógeno establecido por las normas europeas. Así, en 2018, el ayuntamiento aprobó una revisión de este protocolo, haciéndolo más restrictivo, incluyendo medidas de limitación de tráfico. Una vez controladas las situaciones de contaminación extrema, el siguiente paso es reducir el problema estructural de contaminación de Madrid, causado por el excesivo tráfico, con medidas de limitación del transporte permanentes. Para ello, el consistorio llevó a cabo el Plan A, el cual se analizará más adelante.

Sin embargo, la creación de este Plan A no es optativa, ya que, aparte de la obligación moral y ética que supone mejorar la calidad del aire de los ciudadanos, existe una necesidad legal (la Comisión Europea tiene abierto un expediente de infracción contra España desde febrero de 2017 por incumplir los límites legales de contaminantes desde 2010 hasta la fecha). Una vez presentado el Plan A (y un plan distinto para Barcelona desarrollado por su consistorio), la Comisión Europea

eximió a España de llevarle al Tribunal de Justicia de la Unión Europea en mayo de 2018, al cual llevó a Francia, Reino Unido, Alemania, Hungría, Italia y Rumanía por no haber presentado ningún plan de acción convincente, dada la extrema gravedad del problema. Así, la Comisión Europea manifestó su gran respaldo al Plan A, al mismo tiempo de avisar que seguirán supervisando la ejecución de las medidas propuestas.

Sin embargo, en mayo de 2019 ha habido un nuevo cambio de gobierno en la ciudad de Madrid. José Luis Martínez-Almeida, perteneciente al Partido Popular, ha sido investido como nuevo alcalde de Madrid con los apoyos de Ciudadanos y Vox. Almeida ha reiterado en varias ocasiones que su intención es la de derogar una de las medidas estrella del Plan A de Carmena, Madrid Central, justificándose en la falta de libertad que esta medida conlleva, a pesar de la reducción de contaminación que ha supuesto. Sin embargo, el PP necesita mayoría para aprobar una decisión tan trascendente. Por otro lado, Ciudadanos se ha mostrado reacio a derogar la medida completamente, sino que quieren evaluar el Plan A completo con el fin de mantener lo que está funcionando y de mejorar lo que no, por lo que a priori parece que no se va a derogar Madrid Central en el futuro próximo.

Así, la clave de cualquier plan para mejorar la calidad del aire de Madrid reside en la voluntad política la cual decide su puesta en marcha, su presupuesto y se preocupa por realizar una correcta evaluación y seguimiento según el plan se va realizando, con el fin de promover mejoras teniendo en la cabeza el objetivo final: mejorar la salud de los ciudadanos.

## 3 ¿Cómo se regulan las emisiones de los vehículos?

En este apartado se trata la regulación de las emisiones en los vehículos, explicando cómo se lleva a cabo la homologación de emisiones en base a ciertos ensayos. Una vez explicado cómo conseguir una certificación de emisiones, se explicarán las diferentes normativas europeas de limitación de emisiones y cómo éstas han evolucionado a lo largo del tiempo. Por último, se estudiará cómo se clasifican los coches en España en función de sus emisiones al medio ambiente y cómo se relaciona con las normativas europeas.

### 3.1 Homologación WLTP

Con el fin de medir las emisiones contaminantes de los vehículos desde el año 1980 se han realizado ensayos específicos en banco de rodillos previos a la venta del vehículo para medir sus emisiones. Así, desde 1980 a 2017, se ha utilizado el método NEDC (New European Driving Cycle, o nuevo ciclo de conducción europeo), el cual medía las emisiones de los vehículos en dos ensayos: uno que simulaba una conducción en hora punta con atascos tras un arranque en frío y otro que simulaba una conducción en carretera suave, estableciendo una velocidad máxima de 120 kilómetros por hora.

Durante estos años, los fabricantes se han aprovechado de los grandes vacíos en la normativa con los que contaba este sistema, lo cual permitía a los fabricantes conseguir unos resultados de emisiones en el banco de pruebas mucho menores que los consumos y emisiones reales en conducción de los vehículos. Por este motivo han salido a la luz numerosos escándalos en todo el mundo, siendo el más conocido el escándalo de los vehículos diésel de Volkswagen en Estados Unidos, los cuales modificaban sus emisiones (modificando la combustión reprogramando la unidad de control del motor) según se encontrara el vehículo en el banco de rodillos o en carretera. De esta forma, Volkswagen diseñó un sofisticado software que detectaba cuándo el coche estaba en el banco de rodillos (a través de hechos como que únicamente se movían las ruedas motrices, o que las ruedas delanteras giraban sin utilizar el volante). En ese momento, este software de la unidad de control del motor cambiaba el régimen de inyección de combustible, lo cual provocaba que la combustión se realizara a menor presión y temperatura con una peor eficiencia, pero emitía menos óxidos de nitrógeno, lo que les permitía aprobar los requisitos de limitaciones de este tipo de contaminantes. Cuando el vehículo terminaba el ensayo, este software provocaba que el motor volviese a funcionar en el régimen

normal, optimizando el gasto de combustible emitiendo bastante más de lo permitido.

Dada la ineficiencia de la homologación NEDC, en 2017 se desarrolla un nuevo modo de homologación, el WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, o Procedimiento mundial armonizado para ensayos de vehículos ligeros), con el objetivo de garantizar que las emisiones del ensayo se asemejan más a las emisiones reales de los vehículos. Este método establece condiciones de ensayo más estrictas que el anterior y un perfil de circulación más dinámico. Además, este ensayo se ha creado a partir de datos de circulación reales, a diferencia del NEDC, que estaba basado en perfiles de conducción teóricos.

Una vez presentado el método WLTP, la nueva normativa añade una segunda fase. Así, esta nueva normativa se puede dividir en dos partes:

- El propio sistema WLTP, el cual mide emisiones de dióxido de carbono, consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes (monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y partículas en suspensión). Este test se realiza en laboratorio, con una duración mayor que el NEDC y con una conducción más dinámica y más parecida a una conducción real, lo cual mejora los resultados del NEDC, como se ha comentado previamente.
- Test RDE (Real Driving Emissions, o emisiones de conducción reales), el cual comprueba que las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas se cumplen en una conducción en carretera. Estas emisiones se miden a través de unos sistemas portátiles (PEMS) que el vehículo lleva instalado durante un recorrido que se realiza en el exterior y en una carretera pública. Durante este recorrido el vehículo se somete a variaciones aleatorias de parámetros como la aceleración y desaceleración, temperatura ambiente, altitud y carga útil (Ecologistas en acción 2018).

En cuanto a su obligatoriedad, este método se introdujo el 1 de septiembre de 2017 para los modelos nuevos. Además, para el 1 de septiembre de 2018 todos los fabricantes han tenido que adaptar sus motores a esta nueva norma, si bien es cierto que el ministerio de Industria ha concedido una moratoria que permite a los fabricantes utilizar valores correlados entre el NEDC y el WLTP hasta el año 2021, con el fin de facilitar la transición hacia el uso exclusivo del nuevo método de homologación.

La gran diferencia en los perfiles de cada uno de los dos modos de homologación se puede observar en la siguiente imagen:

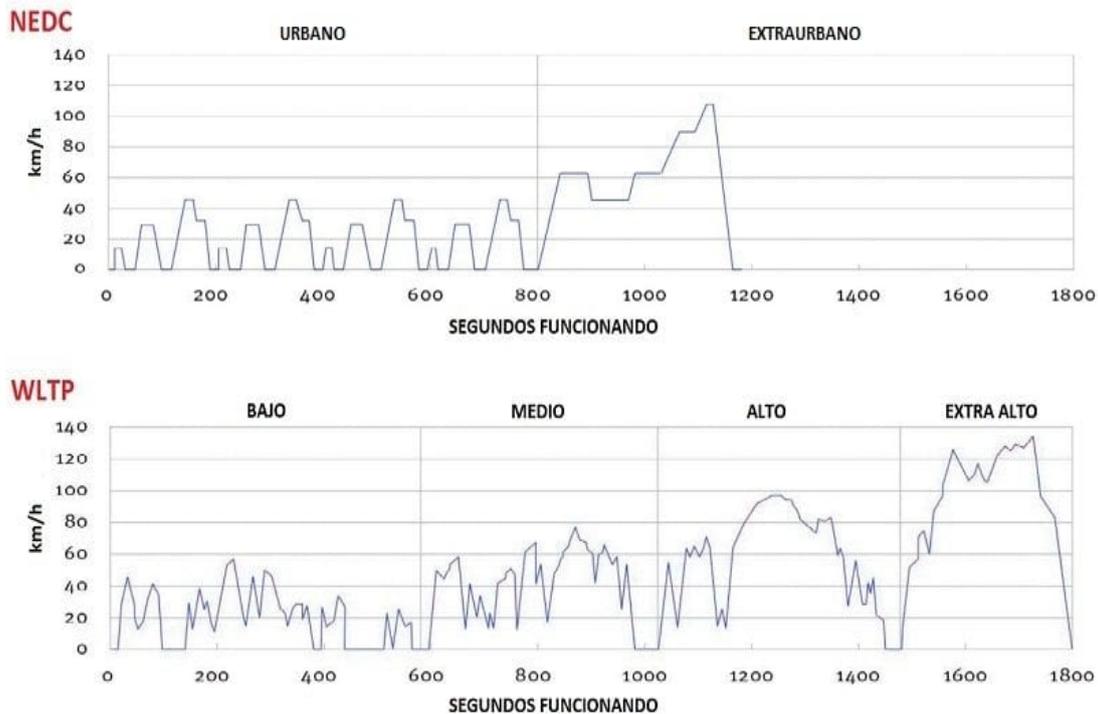


Imagen 8. Diferencia entre los perfiles de los dos tipos de homologación: NEDC y WLTP

Fuente: Actualidadmotor.com

Por otro lado, este nuevo ciclo de homologación tendrá un impacto sobre el impuesto de matriculación de los vehículos. Este impuesto se grava en función de las emisiones de CO<sub>2</sub> del vehículo, por lo que, si las emisiones del ciclo de homologación aumentan (siendo más realistas), es lógico pensar que este impuesto subirá.

Ahora mismo, los tramos del impuesto de matriculación son(Fuentes 2018):

- 0% de impuesto para aquellos vehículos con emisiones inferiores a 120 g/km de CO<sub>2</sub>.
- 4,75% de impuesto para vehículos con emisiones entre 120 g/km y 160 g/km de CO<sub>2</sub>.
- 9,75% de impuesto para vehículos con emisiones entre 160 g/km y 200 g/km de CO<sub>2</sub>.
- 14,75% de impuesto para vehículos con emisiones superiores a 200 g/km de CO<sub>2</sub>.

### 3.2 Estándares de emisiones europeos: normativas EURO

Con el fin de reducir las emisiones contaminantes de los vehículos que se fabrican y venden en Europa, la Unión Europea ha realizado distintas legislaciones desde 1988, llamadas normas EURO, las cuales establecen los límites de contaminantes permitidos que los vehículos pueden emitir. Así, cada normativa EURO es más restrictiva que la anterior. Desde la normativa EURO 0 se han legislado hasta siete normas EURO, siendo la última y actual norma EURO 6.

Aparte de ir limitando cada vez más las emisiones, estas normas también obligaban a los vehículos a incorporar las más novedosas tecnologías de reducción de emisiones, como es el caso de la EURO 1 que obligaba a instalar catalizadores en el vehículo, la EURO 5 que obligaba a los vehículos diésel a incorporar un filtro de partículas o la EURO 6 que obliga a instalar catalizadores SCR en los coches diésel.

También se distinguen las normas EURO en función del combustible del vehículo, por lo que existen normas EURO distintas para diésel que para gasolina. Así, los límites para vehículos diésel según las diferentes normas EURO que han existido son:

<b>Norma</b>	<b>Fecha</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>
EURO 1	Julio 1992	2,72	-	0,97	-	0,14
EURO 2	Enero 1996	1,00	-	0,70	-	0,08
EURO 3	Enero 2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05
EURO 4	Enero 2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
EURO 5	Septiembre 2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005
EURO 6	Septiembre 2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005

*Tabla 6. Límites de emisiones según normativas EURO para turismos diésel (en g/km)*

*Fuente: Elaboración propia*

De la misma forma, para los límites para vehículos gasolina son:

<b>Norma</b>	<b>Fecha</b>	<b>CO</b>	<b>HC</b>	<b>HC+NOx</b>	<b>NOx</b>	<b>PM</b>
EURO 1	Julio 1992	2,72	-	0,97	-	-
EURO 2	Enero 1996	2,2	-	0,5	-	-
EURO 3	Enero 2000	2,3	0,2	-	0,15	-
EURO 4	Enero 2005	1,0	0,1	-	0,08	-
EURO 5	Septiembre 2009	1,0	0,1	-	0,06	0,005
EURO 6	Septiembre 2014	1,0	0,1	-	0,06	0,005

*Tabla 7. Límites de emisiones según normativas EURO para turismos gasolina (en g/km)*

*Fuente: Elaboración propia*

Como ya se ha explicado previamente, los contaminantes que más se deben restringir son los óxidos de nitrógeno y las partículas en suspensión. Para hacernos una idea de la gran reducción que han supuesto las distintas normas EURO, a continuación, se muestra la evolución de los límites en los óxidos de nitrógeno para vehículos diésel y gasolina y los límites de partículas en suspensión únicamente para vehículos diésel.

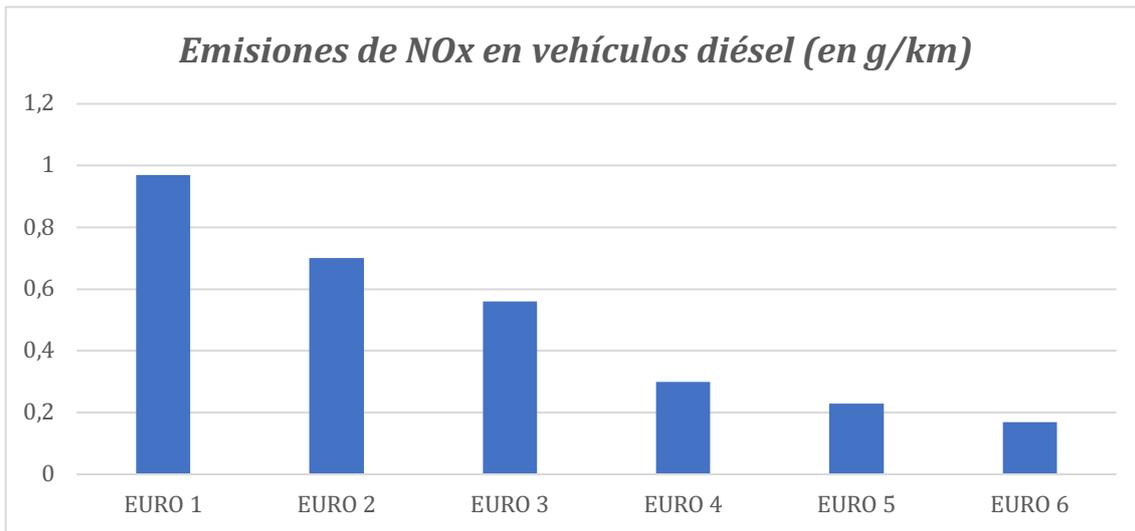


Imagen 9. Evolución de los límites de emisiones de óxidos de nitrógeno en turismos diésel

Fuente: Elaboración propia

Para los datos de emisiones de óxidos de nitrógeno de las normas EURO 1 y EURO 2 se han utilizado los límites de HC+NOx, dado que éstas no presentaban límites únicamente para los óxidos de nitrógeno, como se puede ver en la tabla anterior, tanto para los turismos diésel como para los gasolina.

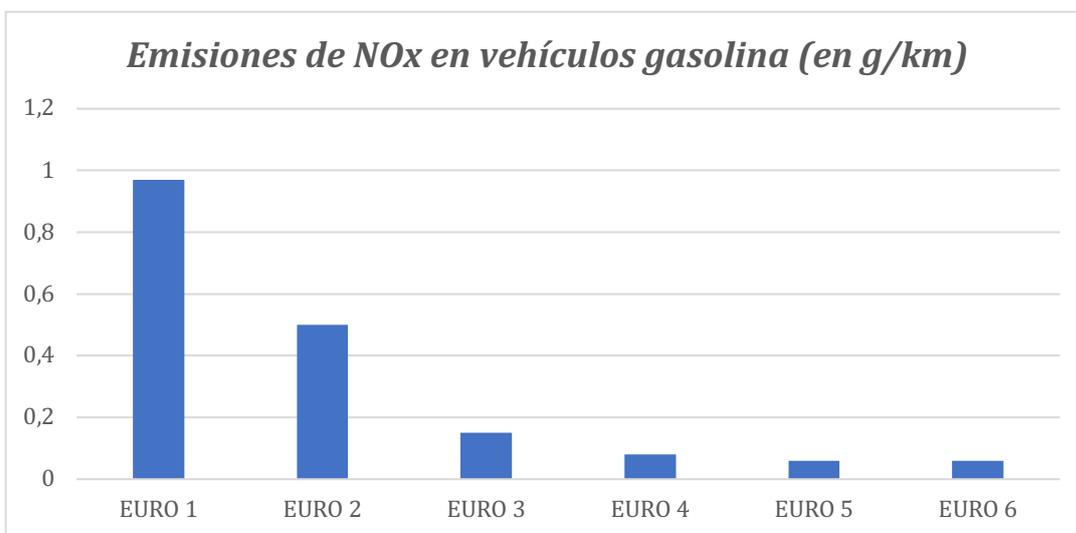


Imagen 10. Evolución de los límites de emisiones de óxidos de nitrógeno en turismos gasolina

Fuente: Elaboración propia

Las emisiones de partículas en suspensión en los vehículos diésel han evolucionado de la siguiente manera:

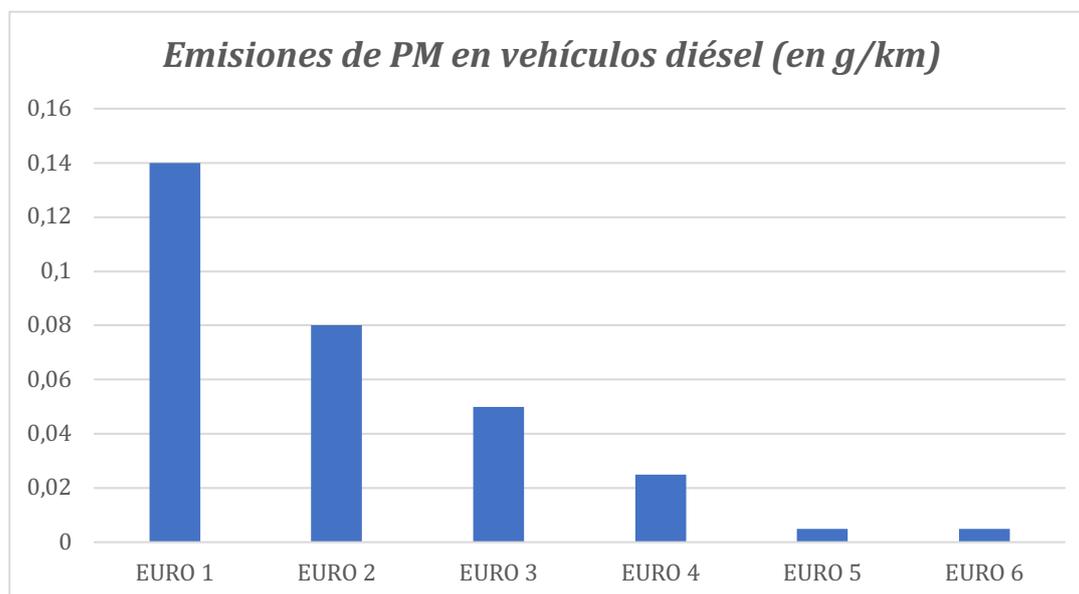


Imagen 11. Evolución de los límites de emisiones de partículas en suspensión en turismos diésel

Fuente: Elaboración propia

### 3.3 Distintivos de la DGT según emisiones en España

Una vez mencionados los límites europeos de emisiones que deben cumplir los vehículos, en España, la DGT ha definido una serie de distintivos o etiquetas más visuales para el consumidor. El fin de estas etiquetas es clasificar el parque de vehículos en función del nivel de emisiones de cada grupo de vehículos, con el objetivo de discriminar positivamente aquellos vehículos que son más respetuosos con el medio ambiente, al mismo tiempo que sirve como instrumento para las políticas municipales (tanto de restricción de tráfico y de episodios de alta contaminación, como de fomento de las nuevas tecnologías para reducir la contaminación del aire). Así, existen cuatro tipos de distintivos medioambientales (RACE 2019):

- **Etiqueta cero emisiones o "CERO"**: son aquellos que no emiten gases a la atmósfera, entre los que se incluyen:
  - Vehículos eléctricos de batería (BEV).
  - Vehículos eléctricos de autonomía extendida (REEV).
  - Vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) con una autonomía mayor de 40 kilómetros.
  - Vehículos de pila de combustible.

- **Etiqueta “ECO”:** son aquellos vehículos que, cumpliendo con las restricciones de la etiqueta C que se comentarán en el siguiente apartado, sean:
  - o Vehículos híbridos enchufables con autonomía menor de 40 kilómetros.
  - o Vehículos híbridos no enchufables (HEV).
  - o Vehículos propulsados por gas natural, gas natural comprimido (GNC) o gases licuados del petróleo (GLP).
  
- **Etiqueta C:** a partir de aquí, estas etiquetas se refieren a vehículos únicamente con motor de combustión propulsados por gasolina o diésel. Los vehículos con etiqueta C deben cumplir los siguientes requisitos:
  - o Turismos y vehículos comerciales ligeros matriculados a partir de 2006 con gasolina como combustible (siempre que cumpla las especificaciones EURO 4, 5 o 6) y desde 2014 con combustible diésel (siempre que cumpla las especificaciones EURO 6).
  - o Transportes de mercancías y vehículos de más de 8 plazas que cumplan con las especificaciones EURO 6 y matriculados después de 2014, para cualquier tipo de combustible.
  
- **Etiqueta B:** estos vehículos son los más antiguos de los que tienen etiquetas, los cuales deben cumplir las siguientes condiciones:
  - o Turismos y furgonetas ligeras gasolina matriculados a partir del año 2000 y diésel a partir de 2006, siempre y cuando cumplan con las especificaciones EURO 3, 4 o 5.
  - o Vehículos de mercancías y vehículos de más de 8 plazas matriculados a partir de 2005, ya sean diésel o gasolina.

Además de estos cuatro distintivos medioambientales, existen vehículos sin derecho a llevar ningún distintivo, lo cual implica que no cumplen con las especificaciones EURO 3 para los gasolina ni EURO 4 y 5 para diésel (los gasolina anteriores al año 2000 y los diésel anteriores al año 2006). Estos vehículos se consideran los más contaminantes y los que mayores restricciones tienen en términos de circulación (sobre todo en episodios de contaminación). La colocación del distintivo en zona visible en el parabrisas es obligatoria, por lo menos en la ciudad de Madrid, en donde se imponen multas a aquellos que deben llevarla y no lo hacen.

El único problema que presentan estos distintivos es que se clasifican en función de las normas EURO, las cuales se comprueban mediante ensayos NEDC hasta recientemente. Así, si las emisiones que se atribuyen a un vehículo no son las reales, como se explicó en el apartado 3.1, éstas etiquetas no están clasificando los vehículos correctamente. Por tanto, numerosas asociaciones ecologistas alertan de

que “estas etiquetas están basadas en sistemas de homologación caducos e ineficaces que han permitido que existan numerosos vehículos que emiten mucho más de lo permitido y de lo que muestran sus ensayos de emisiones”(Villa 2018). Estas declaraciones se deben a un estudio de la iniciativa TRUE, el cual ha recopilado datos medidos en condiciones reales sobre óxidos de nitrógeno de cientos de miles de turismos entre 2011 y 2017 en Francia, España, Suiza, Reino Unido y Suecia, concluyendo que los gasolina se ajustan a las normativas, pero que los diésel superan los límites con mucha diferencia. Los resultados de este estudio se muestran en la siguiente figura:

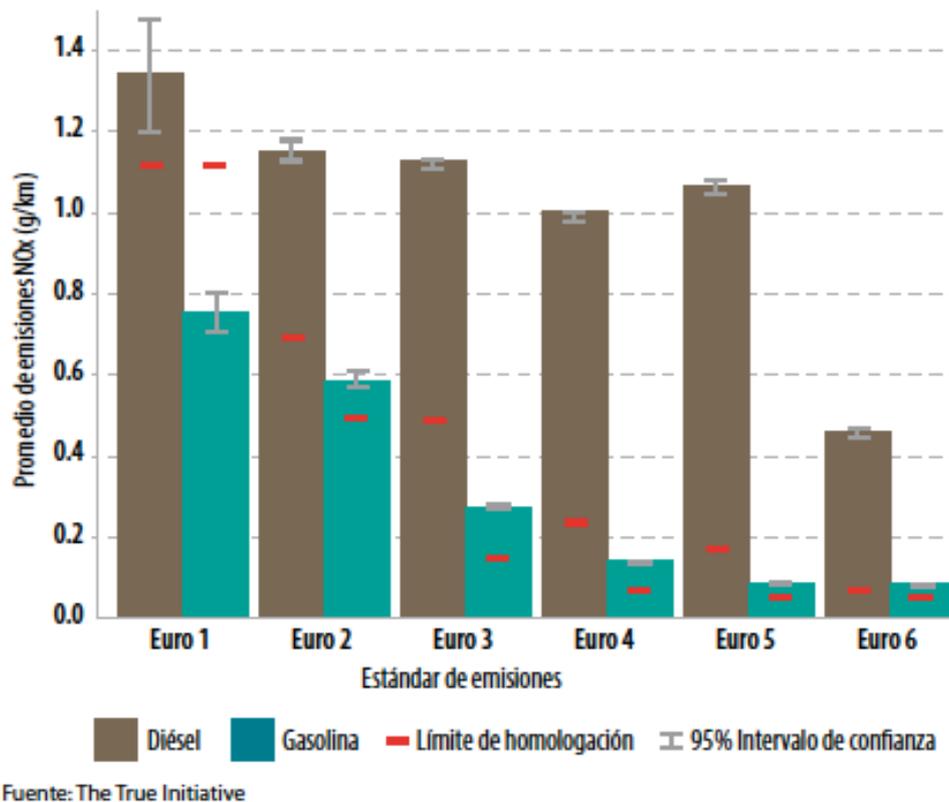


Imagen 12. Comparativa de emisiones de NOx entre las reales y los límites de cada normativa EURO

Fuente: “Distintivos ambientales de la DGT y emisiones en condiciones reales”. Ecologistas en acción

Así, la solución a este problema pasa por el nuevo método de homologación WLTP, el cual es necesario, y por una nueva clasificación de etiquetas basadas en este nuevo ciclo de homologación, el cual mide las emisiones reales de los vehículos.

## 4 Tipos de vehículos en Madrid

Una vez explicado cómo se miden las emisiones en los vehículos y cómo se clasifican los vehículos en España en torno a las distintas normas EURO, en este apartado se pretende mostrar la estructura de la flota municipal de vehículos cuya propiedad es del ayuntamiento de Madrid y una caracterización del parque de vehículos circulante de Madrid.

### 4.1 Flota municipal de vehículos en el municipio de Madrid

En primer lugar, se va a analizar cómo es la flota de vehículos municipales en Madrid, es decir, aquellos vehículos propiedad del ayuntamiento que realizan los distintos servicios públicos. Así, estos vehículos se dividen en tres áreas de gobierno:

- Área de gobierno de economía y hacienda.
- Área de gobierno de medio ambiente y movilidad.
- Área de gobierno de salud, seguridad y emergencias.

En función del área, del tipo de vehículo y de los distintivos de emisiones, la flota municipal de Madrid está compuesta por:

<b>TIPO</b>	<b>CERO</b>	<b>ECO</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>NO DIST.</b>	<b>TOTAL</b>
<b>Economía y hacienda</b>	<b>38</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>63</b>
Turismos	33	1	2	3	1	40
Furgonetas	5	2	-	6	1	14
Camiones	-	1	-	1	6	8
Vehículo especial	-	-	-	-	1	1
<b>Medio ambiente y movilidad</b>	<b>57</b>	<b>116</b>	<b>130</b>	<b>63</b>	<b>92</b>	<b>458</b>
Turismos	44	7	-	5	7	63
Furgonetas	-	-	-	30	10	40
Camiones	-	109	1	-	12	122
Vehículo especial	-	-	-	-	43	43
Motos	13	-	129	27	-	169
Autobuses	-	-	-	1	17	18
Remolques	-	-	-	-	1	1
Todoterrenos	-	-	-	-	2	2
<b>Salud, seguridad y emergencias</b>	<b>39</b>	<b>17</b>	<b>803</b>	<b>524</b>	<b>148</b>	<b>1531</b>
Turismos	29	16	355	97	30	527
Furgonetas	-	1	95	71	31	198
Camiones	-	-	87	25	45	157
Vehículo especial	-	-	-	-	6	6

Motos	10	-	215	249	17	<b>491</b>
Autobuses	-	-	5	-	6	<b>11</b>
Remolques	-	-	-	-	6	<b>6</b>
Todoterrenos	-	-	20	3	2	<b>25</b>
Ambulancias	-	-	26	79	5	<b>110</b>
<b>TOTAL</b>	<b>134</b>	<b>137</b>	<b>935</b>	<b>597</b>	<b>249</b>	<b>2052</b>
<b>(%)</b>	<b>6,5</b>	<b>6,7</b>	<b>45,6</b>	<b>29,1</b>	<b>12,1</b>	<b>100%</b>

Tabla 8. Caracterización de la flota municipal de Madrid por distintivos DGT

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se puede ver que aún un 12,1% (38 turismos, 42 furgonetas, 63 camiones, 50 vehículos especiales, 17 motos, 23 autobuses, 7 remolques, 4 todoterrenos y 5 ambulancias, 249 vehículos en total) no tienen distintivo de emisiones, lo que les convierte en los más contaminantes de la flota municipal.

## 4.2 Parque circulante de la ciudad de Madrid

Con el fin de establecer medidas sobre el parque de vehículos de la ciudad de Madrid, es necesario conocer cuál es el estado del parque circulante actual. En este apartado se pretende mostrar el parque circulante de Madrid durante el año 2017, que no es el mismo que el parque de vehículos censado. Para ello, se ha utilizado un informe realizado en 2018 por la Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial y por la Escuela técnica superior de ingenieros industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, llamado “Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid”(Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental de Madrid 2018). Este informe ha sido encargado por el ayuntamiento de Madrid, ya que una caracterización de las características y de los tipos de vehículos que circulan por Madrid es necesaria para calcular las emisiones del tráfico rodado en la ciudad, así como para tomar decisiones y llevar a cabo políticas específicas sobre el transporte. Así, este informe estima los recorridos realizados (en vehículos\*kilómetro) diferenciando entre tipo de vehículo, combustible y tecnología de reducción de emisiones, lo cual los clasifica también según las etiquetas medioambientales.

El fin principal de este estudio es definir un “vehículo tipo”, el cual se define como “la distribución representativa de los recorridos por tipología de vehículo en una determinada zona”(Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental de Madrid 2018), con el objetivo de realizar a posteriori un cálculo agregado de emisiones en el área a estudiar. De esta forma, se divide la ciudad de Madrid en cinco zonas, que son las siguientes:

<b>Zona</b>	<b>Descripción</b>
A	Interior de la M-30
B	M-30
C	Zona entre la M-30 y la M-40
D	M-40
E	Exterior de la M-40

Tabla 9. Zonificación establecida para el estudio del parque circulante de Madrid en 2017  
 Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid

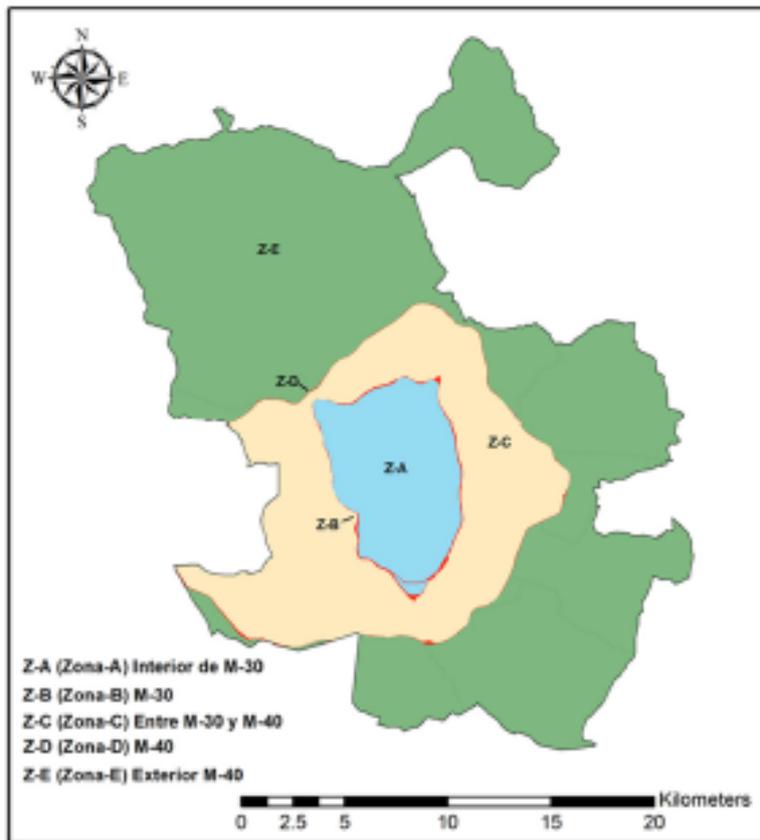


Imagen 13. División de Madrid en zonas para el estudio del parque circulante en Madrid 2017  
 Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid

Este trabajo de fin de máster se centra en reducir las emisiones allí donde son más problemáticas, que es en el centro de Madrid, por tanto, la zona sobre la que se hará más hincapié será la zona A (interior de la M-30).

Tras el conteo y depuración de posibles errores, se identificaron 1.777.065 matrículas distintas, identificadas gracias a la ayuda de la DGT, para las cuales se identificaron un gran número de parámetros, entre los que destacan: tipo de vehículo, combustible y tecnología de reducción de emisiones.

Una vez realizado el estudio, en cuanto a la definición del “vehículo tipo”, el cual permite establecer el porcentaje de los recorridos totales por tipo de vehículo, combustible y tecnología de emisiones, se extrajeron los siguientes resultados:

Sector	ZONAS					TOTAL Municipio
	A	B	C	D	E	
<b>Turismos</b>	<b>72,13%</b>	<b>83,71%</b>	<b>78,36%</b>	<b>83,71%</b>	<b>78,77%</b>	<b>78,93%</b>
Gasolina	21,77%	24,11%	23,15%	24,11%	19,88%	22,31%
Diésel	48,02%	58,20%	53,85%	58,20%	57,78%	55,15%
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	2,33%	1,40%	1,35%	1,40%	1,11%	1,47%
<b>Vehículos ligeros (N1)</b>	<b>5,01%</b>	<b>8,88%</b>	<b>6,97%</b>	<b>8,88%</b>	<b>7,63%</b>	<b>7,36%</b>
Gasolina	0,09%	0,23%	0,12%	0,23%	0,14%	0,15%
Diésel	4,88%	8,61%	6,82%	8,61%	7,47%	7,17%
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	0,04%	0,04%	0,03%	0,04%	0,03%	0,03%
<b>Vehículos pesados (N2 y N3)</b>	<b>1,60%</b>	<b>2,56%</b>	<b>2,15%</b>	<b>2,56%</b>	<b>3,03%</b>	<b>2,41%</b>
Gasolina	0,004%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%
Diésel	1,57%	2,53%	2,12%	2,53%	2,97%	2,37%
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	0,03%	0,02%	0,03%	0,02%	0,05%	0,03%
<b>Autobuses</b>	<b>2,20%</b>	<b>0,97%</b>	<b>2,17%</b>	<b>0,97%</b>	<b>1,76%</b>	<b>1,72%</b>
<b>Autobuses EMT</b>	<b>1,86%</b>	<b>0,08%</b>	<b>1,28%</b>	<b>0,01%</b>	<b>0,35%</b>	<b>0,77%</b>
Gasolina	-	-	-	-	-	-
Diésel	0,87%	0,04%	1,02%	0,00%	0,30%	0,51%
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	1,00%	0,04%	0,26%	0,00%	0,05%	0,26%
<b>Autobuses no EMT</b>	<b>0,33%</b>	<b>0,89%</b>	<b>0,89%</b>	<b>0,96%</b>	<b>1,41%</b>	<b>0,94%</b>
Gasolina	-	-	-	-	-	-
Diésel	0,27%	0,80%	0,78%	0,84%	1,31%	0,84%
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	0,07%	0,09%	0,11%	0,13%	0,10%	0,10%
<b>Ciclomotores</b>	<b>0,34%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,20%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,03%</b>	<b>0,12%</b>
Gasolina	0,34%	0,00%	0,20%	0,00%	0,03%	0,12%
Diésel	-	-	-	-	-	-
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	-	-	-	-	-	-
<b>Motocicletas</b>	<b>8,25%</b>	<b>0,43%</b>	<b>2,33%</b>	<b>0,43%</b>	<b>0,86%</b>	<b>2,42%</b>
Gasolina	8,18%	0,42%	2,32%	0,42%	0,86%	2,40%
Diésel	-	-	-	-	-	-
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	0,07%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,02%
<b>Taxis</b>	<b>10,47%</b>	<b>3,46%</b>	<b>7,83%</b>	<b>3,46%</b>	<b>7,93%</b>	<b>7,05%</b>
Gasolina <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-
Diésel	6,62%	2,24%	4,99%	2,24%	5,17%	4,53%
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	3,85%	1,22%	2,84%	1,22%	2,76%	2,53%
<b>TOTAL</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
Gasolina	30,39%	24,77%	25,79%	24,77%	20,91%	24,98%
Diésel	62,22%	72,42%	69,58%	72,42%	75,00%	70,57%
Otros (GLP, GNC, híbridos, eléctricos)	7,39%	2,82%	4,63%	2,82%	4,10%	4,44%

Tabla 10. Composición del vehículo tipo por combustible y zona

Fuente: “Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017”, Ayuntamiento de Madrid

En esta tabla se puede apreciar que el sector de turismos es el más relevante en todas las zonas, suponiendo el 78,9% de todos los recorridos realizados en todo el municipio de Madrid, así como el 72,1% dentro del perímetro cerrado por la M-30.

Por otro lado, en cuanto a los diferentes combustibles, se ve un claro dominio del diésel en toda la ciudad, alcanzando su menor valor en el interior de la M-30, lo cual supone una relativa buena noticia, teniendo en cuenta la importancia de la reducción del uso del diésel en la mejora de la calidad del aire, especialmente en cuanto a partículas en suspensión y a óxidos de nitrógeno.

En cuanto a los recorridos realizados en función de las tecnologías de reducción de emisiones, lo cual va directamente ligado a las etiquetas de la DGT, se obtuvieron los siguientes resultados para turismos, vehículos ligeros y vehículos pesados:

Distintivo DGT	ZONAS					TOTAL Municipio
	A	B	C	D	E	
Sin distintivo	13,41%	19,30%	17,66%	19,30%	19,33%	17,90%
B	47,47%	49,02%	48,95%	49,02%	49,75%	48,94%
C	35,92%	30,03%	31,70%	30,03%	29,54%	31,32%
ECO	2,19%	1,44%	1,55%	1,44%	1,26%	1,54%
CERO	1,01%	0,21%	0,14%	0,21%	0,12%	0,30%
<b>Total</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

Tabla 11. Distribución de turismos por distintivo de la DGT

Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid

Se puede observar que el 13,41% de los trayectos en la zona A se realizan en turismos sin distintivo, esto es, los vehículos más contaminantes. Aún así, el mayor número de recorridos se realizan en turismos con distintivo B.

Distintivo DGT	ZONAS					TOTAL Municipio
	A	B	C	D	E	
Sin distintivo	18,74%	22,04%	21,66%	22,04%	21,89%	21,49%
B	58,39%	55,50%	57,92%	55,50%	57,68%	57,09%
C	22,13%	22,00%	19,96%	22,00%	20,09%	20,96%
ECO	0,34%	0,29%	0,29%	0,29%	0,26%	0,29%
CERO	0,40%	0,17%	0,17%	0,17%	0,09%	0,18%
<b>Total</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>

Tabla 12. Distribución de vehículos ligeros por distintivo de la DGT

Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid

Distintivo DGT	ZONAS					TOTAL Municipio
	A	B	C	D	E	
Sin distintivo	19,10%	23,76%	21,15%	23,76%	23,99%	22,65%
B	46,50%	42,80%	47,35%	42,80%	47,43%	45,92%
C	33,66%	32,89%	30,87%	32,89%	28,27%	30,93%
ECO	0,01%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,01%
CERO	0,74%	0,54%	0,61%	0,54%	0,31%	0,50%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Tabla 13. Distribución de vehículos pesados por distintivo de la DGT

Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid

Por otro lado, este estudio concluye que la media de edad de los vehículos que circulan por Madrid es muy alta, lo cual contribuye a la contaminación, como se puede observar en la siguiente tabla:

SECTOR	Edad media (años)
Turismos	9,8
Vehículos ligeros	10,7
Vehículos pesados	10,6
Autobuses	8,6
Motocicletas	8,9
Taxis	4,3

Tabla 14. Edad media de cada tipo de vehículo del parque circulante de Madrid 2017

Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid

Siendo la distribución de turismos según su antigüedad la siguiente:

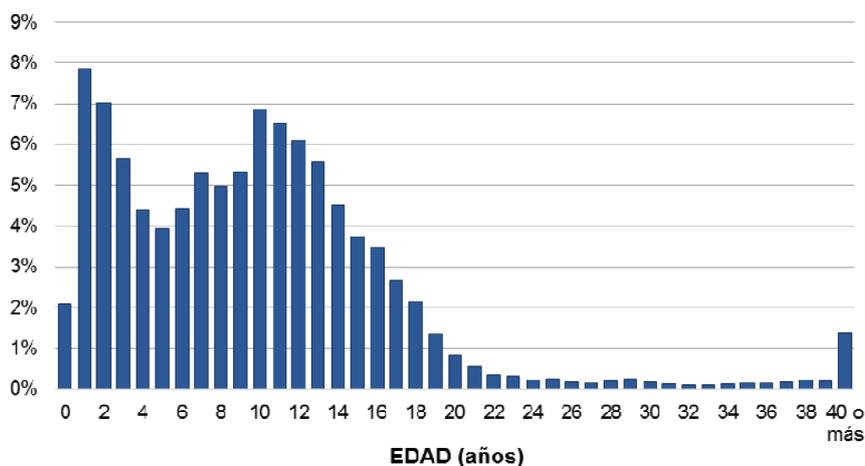


Imagen 14. Distribución del parque de turismos por edades en Madrid

Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid

Por lo tanto, podemos concluir que Madrid tiene un parque circulante relativamente nuevo en taxis, pero todavía antiguo en el resto de sectores. Las medidas a llevar a cabo en cuanto a la limitación de vehículos según emisiones deberían enfocarse en eliminar, o por lo menos restringir su acceso dentro de la M-30, los vehículos sin distintivos en los próximos años, incentivando la compra de nuevos vehículos poco o no contaminantes con ayudas por parte de la administración (tanto por parte del ayuntamiento como por parte del estado).

Por otro lado, en cuanto a la circulación en las distintas zonas de Madrid, para las composiciones en cada zona, se utilizará la distribución porcentual de los recorridos totales por zona obtenidas en el año 2016 según el modelo del ayuntamiento de Madrid. Así, el porcentaje de circulación en cada zona es el siguiente:

A	B	C	D	E	TOTAL
17,4%	13,1%	26,8%	15,8%	26,9%	100,0%

*Tabla 15. Distribución porcentual de recorridos por zonas en Madrid en 2016*

*Fuente: "Estudio del parque circulante de la ciudad de Madrid 2017", Ayuntamiento de Madrid*



## 5 ¿Qué se está haciendo para reducir la contaminación actualmente?

Una vez comprobado que la principal causa de contaminación de óxidos de nitrógeno y partículas en suspensión es el tráfico rodado, en este apartado se va a estudiar qué se está haciendo en otras ciudades (principalmente europeas, ya que Madrid se rige bajo las normativas europeas de contaminación) respecto al transporte para mejorar la calidad del aire de las ciudades. Dentro de este objetivo se pueden identificar dos grandes responsables que pueden tomar medidas para reducir los contaminantes emitidos por los vehículos. Por un lado, las administraciones tienen tanto el poder de regular el tráfico, como el poder para proveer a los ciudadanos alternativas sostenibles al transporte particular. Por otro lado, los fabricantes de automóviles son los encargados de la producción de los vehículos y deben desarrollar nuevas tecnologías (tanto preventivas como paliativas) para que los vehículos reduzcan sus niveles de emisiones contaminantes. Así, en este apartado se estudiará por un lado qué están haciendo actualmente las administraciones de las principales ciudades europeas y qué están haciendo los fabricantes de automóviles para reducir las emisiones de estos.

### 5.1 Planes para mejorar la calidad del aire en otras ciudades del mundo

Con el fin de desarrollar una serie de medidas para Madrid, primeramente, se van a analizar qué medidas se están llevando actualmente en otras ciudades del mundo, para ver cuáles se podrían implantar en Madrid.

#### 5.1.1 Barcelona, España

En Barcelona, debido a su localización costera, se suelen dar pocos episodios de contaminación a lo largo del año (entre 0 y 3), los cuales suelen producirse por concentración de dióxido de nitrógeno o de partículas en suspensión PM10. Estos episodios coinciden con anticiclones, los cuales conllevan precipitaciones y ausencia de viento. Las autoridades barcelonesas asocian 3.500 muertes (Constantini et al. 2018) al año debidas a la contaminación (dentro del área metropolitana de Barcelona, compuesta por 36 municipios).

Así, en diciembre del año 2018, la Generalitat (el gobierno de la comunidad autónoma de Cataluña) estableció un protocolo de restricción de tráfico para episodios de contaminación, de forma que es la Generalitat la que declara los

episodios y los municipios quienes aplican las medidas. Previamente a la declaración del episodio se establece una fase de prealerta en la cual se realizan recomendaciones a los ciudadanos. Una vez declarado el episodio de contaminación, se prohíbe la circulación de aquellos vehículos que no posean la etiqueta ambiental de la DGT dentro del perímetro de las Rondas (un cinturón que rodea a la ciudad de Barcelona y a otros seis municipios), la zona que se denomina de bajas emisiones. Las motocicletas se empezarán a restringir a partir de 2019, mientras que las restricciones definitivas se llevarán a cabo en 2020, aunque no se declare el episodio de contaminación. Aún así, todavía falta por definir un protocolo para los camiones, autobuses y furgonetas que todavía son Euro 1, 2 y 3.

Por otro lado, el resto de políticas en favor de una movilidad sostenible son una suma de diversas actuaciones. Por un lado, se tiene como objetivo casi triplicar la red existente de carriles bici, de 130 kilómetros en 2015 se quiere llegar a los 300, habiendo construido ya más de 200 (los cuales se realizan en la calzada o sobre carriles para coches o aparcamiento). Por otro lado, en cuanto al transporte público, el consistorio está transformando la red de autobuses hacia una red cuadrículada (con líneas horizontales y verticales), las cuales mejoran la velocidad comercial. Por último, el ayuntamiento de Barcelona ha desarrollado la idea de la creación de supermanzanas (agrupando nueve manzanas con el fin de restringir el tráfico), donde se gana espacio para los peatones o para zonas de juegos (la primera se llevó a cabo en Poblenou con una gran polémica al inicio, aunque se ha flexibilizado y ahora es un éxito).

### **5.1.2 Berlín, Alemania**

El ayuntamiento de la ciudad de Berlín reconoce los altos niveles de dióxido de nitrógeno existentes (prácticamente dobla el nivel limitado por la Unión Europea) como un problema muy grave. Además, se ha calculado que cerca de 10.000 personas fallecen al año a causa de la contaminación del aire, afectando principalmente a personas con problemas cardiovasculares y personas con asma.

Asimismo, con el fin de reducir la contaminación se han llevado a cabo dos medidas respecto al tráfico en Berlín. La primera medida consiste en limitar a 30 kilómetros por hora en las calles más importantes. La segunda medida, creada en 2008, consiste en la creación de un área medioambiental (la cual se puede observar en la siguiente imagen) de 88 kilómetros cuadrados, en la cual únicamente pueden circular aquellos coches que posean un distintivo verde, destinado a aquellos coches cuyo estándar de emisiones corresponda con un Euro 4 o superior, así sólo podrán circular aquellos coches menos contaminantes.



Imagen 15. Área medioambiental de Berlín

Fuente: "Madrid Central: así actúan otras ciudades contra la contaminación", EuropaPress

Por otro lado, en 2018, el consistorio aprobó un paquete de medidas en el cual se encuentra un incentivo para la compra de taxis híbridos de 2.500 euros. Aparte, el ayuntamiento ha decidido comprar autobuses eléctricos para mejorar el servicio de transporte público.

Por otra parte, en la actualidad, el gobierno federal alemán esta estudiando la inclusión del distintivo azul, una pegatina que llevarían aquellos coches que sean Euro 6. Actualmente, en varias ciudades como Hamburgo, Frankfurt y Stuttgart, las ciudades pueden prohibir el acceso a vehículos diésel Euro 5, lo cual podría afectar a cerca de 10 millones de vehículos. Durante 2017, más de setenta ciudades alemanas superaron los límites de dióxido de nitrógeno establecidos por la UE, siendo Berlín una de ellas.

### 5.1.3 París, Francia

El consistorio de París cifra en 2.500 las personas que mueren cada año debido a enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica, y considera que el 90% de la población vive en un ambiente contaminado. Además, en Francia se producen cerca de 48.000 muertes prematuras debidas a esta causa, considerada la tercera causa de muerte después del tabaco y del alcohol.

En París, desde el año 2017 es obligatorio circular con una etiqueta que certifique el nivel de contaminantes emitido por el vehículo, siendo multados aquellos que no la lleven visible. Estas etiquetas clasifican a los coches en cinco categorías, siendo la categoría 5 la más contaminante, la cual tiene prohibido circular entre las 8 y las 20

horas en días laborables, y siendo la categoría 1 la menos contaminante. Esta clasificación va en función de en qué año se realizó la primera matriculación del vehículo, su eficiencia energética y su concentración de emisiones. En episodios de alta contaminación, se utiliza la circulación diferenciada, bajo la cual se prohíbe la circulación de los coches más contaminantes en función de las etiquetas. El ayuntamiento también puede decidir aplicar medidas extraordinarias, como reducir el precio del transporte público a una tarifa única diaria de 3,80 euros para viajar durante el día en la ciudad de París, lo cual conlleva un coste de 500.000 euros al día para el ayuntamiento.

Estas etiquetas están limitadas a la zona de bajas emisiones, la cual cubre prácticamente toda la ciudad, en la cual residen 5,6 millones de personas, como se puede observar en la siguiente imagen. El objetivo para 2030 es que únicamente puedan circular en esta zona los vehículos nuevos.

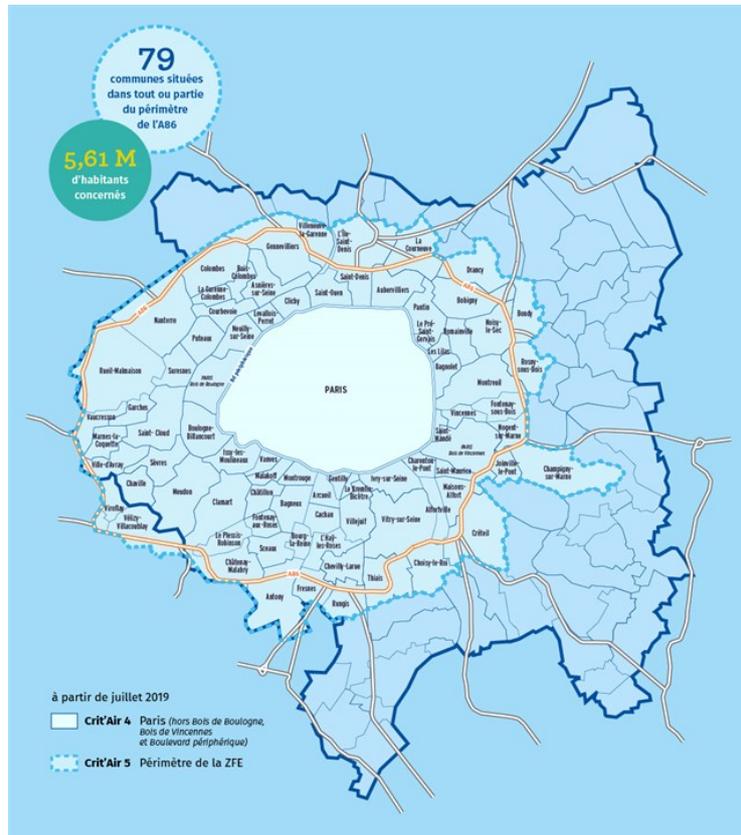


Imagen 16. Mapa de la zona de bajas emisiones de París

Fuente: "Madrid Central: así actúan otras ciudades contra la contaminación", EuropaPress

Por otro lado, París tiene la intención de avanzar hacia la prohibición total de aquellos vehículos que más contaminen hasta acabar definitivamente con todos los coches diésel en 2024 y con todos aquellos de combustión interna para 2030. Aquellos vehículos diésel matriculados antes del año 2000 han sido prohibidos en

la zona de bajas emisiones el 1 de julio de 2019 y los Euro 3 (diésel hasta 2010 y gasolina entre 1997 y 2005) se prohibirán en 2022. Además, cualquier coche matriculado antes de 1997 y cualquier moto matriculada antes del 2000 tienen prohibida su circulación dentro de la ciudad de París.

#### **5.1.4 Londres, Reino Unido**

Desde el año 2010, Londres ha superado todos los años los límites de contaminación legales establecidos por la Unión Europea. En el año 2018, como en el resto de años anteriores, el nivel máximo legal para todo el año se superó antes del final del mes de enero, lo cual supone un grave problema para la ciudad de Londres. Así, cada año mueren más de 9.000 habitantes debido a la contaminación del ambiente. En Londres, el 50% de la contaminación es debida al transporte, especialmente a los que utilizan combustible diésel.

En la ciudad de Londres existen dos zonas delimitadas con el fin de reducir los altos niveles de contaminación de la ciudad: la zona de bajas emisiones (LEZ, en amarillo en la imagen) y la zona de emisiones ultrabajas (ULEZ, en naranja en la imagen) (“Madrid Central: Así Actúan Otras Ciudades Contra La Contaminación” 2019), que se pueden observar en la siguiente imagen.

La zona de bajas emisiones ocupa cerca de 1.500 kilómetros cuadrados, lo cual equivaldría a prácticamente tres veces la ciudad de Madrid, y afecta a casi todos los distritos de la ciudad. Esta zona está activa desde el año 2008 durante las 24 horas del día y supone pagar multas de entre 100 y 200 libras a aquellos vehículos que no cumplan con las condiciones medioambientales. Por otro lado, en abril de 2019, el consistorio decidió crear la zona de ultrabajas emisiones, la cual consiste en una tarifa única de 12,5 libras por acceder durante un día a dicha zona. Esta nueva zona será ampliada en el año 2021 y llegará a cubrir cerca de 360 kilómetros cuadrados (tres veces la extensión de la ciudad de Barcelona), siendo el área de Madrid Central de 4,7.

Además, todos los conductores que deseen entrar en la zona ULEZ los días laborables entre las 7 y las 18 horas, deberán pagar una tasa de congestión de 11,5 libras diarias, con descuentos para coches híbridos o eléctricos.



Imagen 17. Mapa de las dos zonas de bajas y ultrabajas emisiones de Londres

Fuente: “Madrid Central: así actúan otras ciudades contra la contaminación”, EuropaPress

A todas estas medidas, en octubre de 2018 se añadió una tasa de toxicidad, por la cual los vehículos inferiores a los estándares Euro 4 deben pagar 10 libras por circular. Por otro lado, el consistorio está estudiando prohibiciones de tráfico en algunas zonas en diferentes días, lo cual llaman “días libres de coches”(Constantini et al. 2018).

### 5.1.5 Roma, Italia

Dentro de las grandes ciudades italianas, Roma es la única que no ha superado los límites de contaminación durante el año 2018, siendo las ciudades italianas con más polución Turín (superando 112 días los límites, cuando no se puede superar más de 35 días), Venecia (8 días de superaciones) y Milán (7 días). Además, la situación de Roma ha mejorado susceptiblemente durante los últimos cuatro años. El ayuntamiento calcula que, en Roma, fallecen 1.500 personas al año debido a la contaminación del aire, mientras que en Italia lo hacen 91.000 personas.

Roma establece dos medidas frente a la polución: la clasificación de vehículos por etiquetas y una zona de bajas emisiones (Zona Traffico Limitato). En primer lugar, en Roma se clasifican los vehículos (incluidas las motocicletas) según su tasa de emisión, año de matriculación y sus características específicas. En episodios de alta contaminación, para compensar la baja eficiencia del transporte público, el consistorio fomenta el préstamo temporal de vehículos y acaba de activar un

sistema de alquiler de bicicletas sin bases fijas. En segundo lugar, el consistorio de Roma ha establecido una zona de bajas emisiones limitada al centro de la ciudad (como se puede observar en la imagen 11), como en el caso de Madrid, que únicamente se activa de 6 a 18 horas, mientras que el resto del día no existen limitaciones de tráfico. Además, se corta el tráfico las noches de los viernes y sábados en algunas zonas del centro desde las 23 hasta las 3 horas, lo cual no ocurre en otras ciudades.

Además, el ayuntamiento de Roma tiene previsto acabar totalmente con el tráfico de vehículos diésel privados, los cuales estarán prohibidos en el centro de la ciudad a partir del año 2024.



Imagen 18. Zona de bajas emisiones de la ciudad de Roma

Fuente: "Madrid Central: así actúan otras ciudades contra la contaminación", EuropaPress

### 5.1.6 Lisboa, Portugal

Dentro de la ciudad de Lisboa existen numerosas alternativas de transporte como autobuses, tranvías, motos, coches, patinetes o bicis, tanto por el asfalto como por las aceras. Aún así, la política de movilidad en el centro de la ciudad, el peatón no suele tener prioridad. Además, los numerosos adoquines de las calles de Lisboa hacen muy difícil el transporte en bicicleta, aunque existan 80 kilómetros de carriles bici a las afueras de la ciudad, con el objetivo de llegar a los 200 kilómetros en dos

años. Además, en el centro de la ciudad únicamente se superaron los límites de polución durante 23 días en el año 2017.

Por otra parte, en el centro de la ciudad existe, desde 2011, una zona de bajas emisiones (que se puede ver en la siguiente imagen), que hace que en la zona más céntrica únicamente estén habilitados para circular los vehículos fabricados después del año 2000, mientras que en el área que rodea a esta zona únicamente pueden circular los fabricados tras el año 1996. Sin embargo, esta norma no se cumple, dado que no se ha impuesto ninguna multa en los últimos tres años. Además, existen algunos barrios en los que únicamente se permite el tráfico vecinal (como en los barrios de Alfama, Barrio Alto o la Morería (Constantini et al. 2018)), por falta de espacio para más vehículos.



Imagen 19. Zona de bajas emisiones de la ciudad de Lisboa

Fuente: "Madrid Central: así actúan otras ciudades contra la contaminación", EuropaPress

### 5.1.7 Ámsterdam, Países Bajos

La ciudad de Ámsterdam presenta una zona de bajas emisiones que prácticamente ocupa toda la ciudad (que se muestra en la siguiente imagen), la cual afecta a motocicletas, autobuses, taxis y furgonetas que usen diésel. Dentro de dos años, el consistorio ha decidido prohibir la entrada a los diésel anteriores a 2005, además de tener el objetivo de que para 2030 únicamente puedan entrar coches de cero emisiones, lo cual se aplicará al transporte público y a los vehículos privados.



*Imagen 20. Zona de bajas emisiones de la ciudad de Ámsterdam*

*Fuente: "Madrid Central: así actúan otras ciudades contra la contaminación", EuropaPress*

El partido que gobierna la ciudad de Ámsterdam es el partido de izquierdas ecologista holandés, Groen Links, cuyo objetivo es conseguir una ciudad sin coches. El hecho de que Ámsterdam tenga un centro histórico lleno de turistas, un cinturón de canales del siglo XVII, calles empedradas y poco espacio para el transporte hacen que no sea una tarea fácil, dado que gran parte del espacio sigue ocupado por el transporte rodado. Sin embargo, desde el ayuntamiento aseguran que los vecinos cada vez más venden sus coches sin comprar uno nuevo. Los planes futuros del ayuntamiento pasan por ampliar zonas peatonales y dar prioridad a tranvías y ciclistas creando carriles que unan calles extremadamente concurridas.

### 5.1.8 Bruselas, Bélgica

Bruselas es la región más afectada por la contaminación del aire de las tres regiones que existen en Bélgica, en donde fallecen alrededor de 12.000 personas cada año debido a la polución. El consistorio de Bruselas tiene establecido un calendario con el fin de restringir la circulación a los vehículos más contaminantes. A comienzos de 2019, se ha prohibido la circulación de los vehículos Euro 1. Cada año se irán incluyendo restricciones con el objetivo de que en 2025 sólo puedan circular los coches Euro 6 o posteriores, los cuales reducen las emisiones de dióxido de nitrógeno. En el caso de los coches gasolina, las restricciones serán más paulatinas, dado que para 2025 pretenden haber eliminado los coches inferiores a Euro 3.

### 5.1.9 Oslo, Noruega

En Oslo, la capital de Noruega, el transporte público no produce ruidos. El objetivo del ayuntamiento de Oslo es eliminar la emisión de contaminantes para el año 2025, para lo cual prohibirá los coches diésel y gasolina. Hoy en día, uno de cada tres coches ya son eléctricos (total o parcialmente), además de tener una flota de transporte público (barcos y autobuses) en constante renovación con el fin de conseguir las reducciones de dióxido de carbono para cumplir con los “Acuerdos del Clima” firmados en París en 2015.

La región de la que Oslo es la capital ha puesto en marcha en 2018 el programa Ruter Fossil Free 2020 que tiene como objetivo convertir los 1.110 autobuses de la región en eléctricos para finales de 2020. Hoy en día, el 77% de los autobuses todavía funcionan con diésel. Además, el consistorio está evaluando introducir barcos eléctricos en el fiordo de Oslo.

Para ayudar a los ciudadanos a reducir el uso del coche privado, el ayuntamiento promueve un programa de exención de impuestos a quien compre vehículos eléctricos (coches o bicicletas), de forma que contarían con un 25% de ahorro del IVA y la completa exención del impuesto de matriculación, del pago de peajes y de aparcamiento. Por otro lado, el gobierno de Noruega está invirtiendo grandes cantidades de dinero en mejorar la infraestructura ciclista, dado que su orografía tiene un relieve mayor a la de ciudades como Copenhague o Ámsterdam, las cuales se caracterizan por el uso de la bicicleta.

Todas estas medidas a favor del medio ambiente están financiadas por el fondo soberano de Noruega, el más grande del mundo, el cual recibe la mayor parte de su dinero gracias al petróleo existente bajo las aguas del país, el cual hoy en día representa el 40% del PIB de Noruega. Resulta paradójico que un país financie medidas contra el petróleo vendiendo petróleo a otros países. Sin embargo, tras la

crisis del oro del año 2014, Noruega comenzó a cambiar su mentalidad apostando por un sistema de movilidad que fuese sostenible con el medio ambiente.

### **5.1.10 Nueva York, Estados Unidos**

Una vez mostrados los planes de mejora de calidad del aire de las principales capitales europeas, también es importante mostrar cómo otras capitales mundiales gestionan este problema. Así, la gestión del tráfico en la ciudad de Nueva York es un reto de una complejidad tremenda, debido al incremento de la población, a su anticuada infraestructura de metro y a la disrupción de los servicios de movilidad alternativos al taxi, como Uber, Lyft o Via.

En los últimos cuarenta años, tres veces han sido las que se ha intentado imponer una tasa de congestión para circular por el centro de la ciudad. La última, presentada por el gobernador Andrew Cuomo, pretende cobrar entre 10 y 25 dólares a los vehículos por circular entre el distrito financiero y Central Park a partir de 2021. Con esta tasa, el ayuntamiento pretende generar 1.000 millones de dólares anuales que piensa utilizar para modernizar la red de metro y de cercanías de Nueva York.

Por otro lado, Nueva York está expandiendo el número de carriles bici por barrios que se encuentran fuera de la isla de Manhattan. Esta red ciclista consta de 12.000 bicicletas y 750 estaciones, en la cual se estima que se realizan 70.000 viajes diarios cuando se dan buenas condiciones meteorológicas. Esta red, con más de 145.000 usuarios, se convirtió en una de las claves de la red de transporte de la ciudad con más habitantes de Estados Unidos.

Además, otras de las grandes ciudades americanas como Los Ángeles, Boston, San Francisco o Seattle han acogido muy bien esta medida y están planteándose crear un sistema similar al neoyorquino con el fin de reducir los atascos y conseguir recursos económicos adicionales para mejorar sus actuales infraestructuras de transporte público.

## **5.2 Administración, gobiernos**

### **5.2.1 Plan de mejora de la calidad del aire en Madrid**

El ayuntamiento de Madrid liderado por Manuela Carmena ha llevado a cabo un plan de medidas de mejora de calidad del aire, denominado “Plan de calidad del aire y cambio climático de la ciudad de Madrid” (Ayuntamiento de Madrid 2017), también conocido como Plan A. Este Plan A tiene dos objetivos principales: reducir la contaminación atmosférica de la ciudad de Madrid y ayudar a prevenir el cambio

climático, para lo cual se definen unas estrategias de adaptación. Las acciones que propone se han diseñado para conseguir que Madrid sea un entorno urbano que se caracterice por una alta calidad de vida y por tener un modelo urbano sostenible. Así, el Plan A es clave en la estrategia de desarrollo urbano sostenible que sigue el ayuntamiento de Madrid, con el fin de afrontar los retos ambientales y sociales actuales, como la gran aglomeración urbana que es Madrid.

De esta manera, el Plan A presenta un programa de acción compuesto por 30 medidas, las cuales se dividen en cuatro grandes bloques:

- Movilidad sostenible.
- Regeneración urbana.
- Adaptación al cambio climático.
- Sensibilización ciudadana y colaboración con otras administraciones.

Al tratarse este trabajo de fin de máster sobre medidas aplicadas a vehículos, las medidas más relevantes en este sentido son aquellas dedicadas a la movilidad sostenible. Dentro de la parte de movilidad sostenible, el Plan A diferencia dos tipos de medidas:

- Aquellas enfocadas en reducir la intensidad del tráfico privado y a la promoción del transporte público.
- Aquellas dedicadas a actuar sobre el parque de vehículos, tanto de sectores de alto impacto en la calidad del aire (como puede ser la EMT, los taxis o la distribución de mercancías, entre otros) como de renovación del parque circulante.

Por un lado, las diez medidas adoptadas referentes a reducir la intensidad del tráfico privado son:

- **Área central cero emisiones, conocida como Madrid Central:** con el fin de restringir el tráfico en el centro de la ciudad para crear un entorno con menos contaminación tanto ambiental como acústica, se plantea una zona en la que puedan circular residentes y vehículos no contaminantes, la cual se ampliará a las cuatro áreas de prioridad residencial (APR) existentes. Así, se pretende implantar un nuevo concepto de movilidad, donde los peatones, las bicicletas y el transporte público tengan prioridad. Actualmente, el nuevo gobierno de la ciudad de Madrid liderado por Martínez-Almeida ha anunciado una suspensión de las multas por acceder a esta zona hasta que se disponga de un sistema fiable para llevarlas a cabo, aunque su intención final es la de eliminar esta zona restringida.

- **Rediseño de las vías principales de acceso al centro de la ciudad:** reforma de las calles más importantes que dan acceso al centro de la ciudad, creando carriles específicos para los autobuses para darles prioridad, creando carriles bici y ampliando las aceras.
- **Priorización de la movilidad peatonal:** realizando reformas sobre el espacio público para fomentar la movilidad peatonal, de manera que existan mejores entornos para los peatones. Estas medidas ayudarán a reducir la siniestralidad y la contaminación atmosférica.
- **Mejora y ampliación de la red ciclista:** con el objetivo de aumentar el número de desplazamientos en bicicleta (se pretende llegar al 5% para 2025), se pretende revisar y ampliar la red de itinerarios seguros, habiendo ya más de 30 kilómetros en Madrid y se prevé que se construirán 30 kilómetros más cada año.
- **Ampliación del sistema de bicicletas públicas (BiciMad):** ampliación de zonas y nuevas unidades, integrando la tarjeta necesaria para alquilarlas en la tarjeta de transporte público.
- **Regulación del aparcamiento según los criterios de calidad del aire:** en función de las emisiones de cada vehículo, se le aplicarán bonificaciones o penalizaciones a la hora de aparcar en zona SER, con el objetivo de reducir el estacionamiento dentro de la M-30 de los coches más contaminantes. Así, a partir de 2020, aquellos vehículos sin distintivo ambiental de la DGT no podrán aparcar en zona SER.
- **Limitación de la velocidad máxima en los accesos metropolitanos y en la M-30:** la velocidad máxima permitida para circular en la M-30 y en las vías de acceso a Madrid desde la M-40 se reducirá a 70 kilómetros por hora.
- **Red de aparcamientos disuasorios en la corona metropolitana:** además de los dos aparcamientos disuasorios existentes (gratuitos, en caso de utilizar el transporte público después), se están construyendo 10 más alrededor de la corona metropolitana, con una capacidad de 9.750 plazas en total, los cuales tendrán tarifas que incentiven el uso del transporte público en detrimento del uso del vehículo privado.
- **Vías preferentes para autobuses:** con el fin de mejorar los tiempos de recorrido y la frecuencia de los mismos, se quieren establecer vías

preferentes para los autobuses a través de plataformas reservadas y prioridad semafórica.

- **Infraestructuras reservadas únicamente para transporte público:** como carriles BUS-VAO-ECO (autobuses, vehículos de alta ocupación y los vehículos menos contaminantes) conectados con los aparcamientos disuasorios y con la red de transporte público.

Por otro lado, las once medidas adoptadas referentes al parque de vehículos son:

- **Ampliación y renovación de la flota de autobuses de la EMT:** con el objetivo de una flota 100% con los distintivos ECO o CERO, la EMT va a adquirir 1000 autobuses nuevos entre 2016 y 2019 (250 anuales, en su gran mayoría de GNC, además de híbridos y eléctricos según esta tecnología vaya madurando).
- **Incentivos para una flota de taxi de bajas emisiones:** se han incrementado las subvenciones a aquellos taxis con etiqueta ECO o CERO, a la vez que, desde inicios del 2018, los taxis que se quieran sustituir deben ser por alguno de estos dos tipos obligatoriamente.
- **Optimización del servicio de taxi según criterios ambientales:** gracias a las nuevas tecnologías, se mejorará la eficiencia y la sostenibilidad reduciendo el número de viajes en vacío en la búsqueda de viajeros.
- **Optimización de la distribución urbana de mercancías:** a través de un nuevo sistema de gestión de las plazas destinadas para carga y descarga, se mejorará el sistema de distribución de mercancías.
- **Distribución de mercancías con vehículos de bajas emisiones:** aquellos vehículos de bajas emisiones que se dediquen a la distribución tendrán preferencia a la hora de acceder a Madrid Central y en la zona SER.
- **Colaboración para mejorar la eficiencia en procesos logísticos urbanos:** se desarrollará una colaboración público-privada para crear un modelo de distribución sostenible e innovador.
- **Renovación del parque circulante:** el ayuntamiento tiene el objetivo de renovar el parque circulante reduciendo el número de coches contaminantes de aquí a 2025, para el cual no ha propuesto medidas concretas todavía.

- **Flotas de servicios municipales de bajas emisiones:** renovación paulatina de los vehículos municipales (incluyendo aquellos vehículos de empresas contratistas de servicios municipales), con el objetivo de que en 2030, el 90% de éstos tengan la categoría ECO o CERO.
- **Planes de movilidad laboral sostenible:** colaboración público-privada para desarrollar planes de movilidad sostenible en empresas.
- **Red de recarga de combustibles alternativos y para vehículos eléctricos:** el ayuntamiento de Madrid desarrollará un programa para la creación de redes de recarga en zonas de residencia o trabajo, tanto de vehículos eléctricos como de GNC y de GLP.
- **Impulsar iniciativas de movilidad compartida:** el consistorio fomentará aquellas iniciativas relacionadas con la movilidad compartida y sostenible cuyo objetivo sea mejorar y ampliar la oferta de transportes de Madrid.

## 5.2.2 Incentivos para la renovación del parque de vehículos

En la actualidad existen dos planes para la renovación del parque de vehículos que afecten a la ciudad de Madrid: un plan estatal que depende del gobierno, llamado MOVES, y un plan autonómico fomentado por la Comunidad de Madrid, llamado plan MUS, los cuales se presentan a continuación.

### 5.2.2.1 Plan nacional MOVES

A principios de 2019, el gobierno socialista de Pedro Sánchez impulsó el Programa de Incentivos de Movilidad Eficiente y Sostenible (MOVES), a través de un real decreto 132/2019. Este plan está dotado de 45 millones de euros (Tena 2019), repartidos entre las comunidades autónomas según criterios poblacionales. Así, Andalucía será la comunidad que más dinero reciba (8,1 millones) seguida de Cataluña (7,3 millones), Comunidad de Madrid (6,3 millones) y Comunidad Valenciana (4,8 millones).

Estas ayudas son para vehículos eléctricos ligeros (entre un 20 y un 30% del total, como máximo 13,5 millones) y camiones de gas, dado que la tecnología eléctrica para los camiones no está lo suficientemente desarrollada. Estas ayudas también serán destinadas en gran parte (entre 50 y 60%) hacia la creación de infraestructuras de recarga.

### 5.2.2.2 Plan MUS del gobierno de la Comunidad de Madrid

El gobierno de la Comunidad de Madrid ha puesto en marcha el Plan de Movilidad Urbana Sostenible (MUS) para ayudar en la compra de vehículos ecológicos (Serrano 2019). Este plan estará dotado en 2019 de 3 millones de euros, un millón más que en el año anterior, dado que se agotó 48 horas después de su lanzamiento.

Este plan está destinado a la compra de vehículos por particulares propulsados por energías alternativas, cuyo precio límite no supere los 32.000 euros antes de impuestos. A estas medidas, propuestas por el gobierno de la comunidad, se pueden añadir las aportaciones que hagan los concesionarios.

## 5.3 Fabricantes de vehículos

Por otro lado, los fabricantes de automóviles son responsables de desarrollar nuevas alternativas de vehículos menos contaminantes, además de reducir las emisiones de aquellos que más contaminan, como los diésel.

### 5.3.1 Modelos de vehículos existentes

Actualmente existe una gran incertidumbre en España a la hora de comprar un coche ante la intención del Gobierno de Pedro Sánchez de prohibir la venta de vehículos que utilicen motores de combustión en 2040 y de eliminarlos de la circulación en 2050. Este hecho, además de las restricciones de tráfico llevadas a cabo en Madrid a través del plan Madrid Central, han supuesto que los fabricantes se esfuercen por desarrollar vehículos que emitan menos emisiones (o ninguna en el caso de los eléctricos). Así, las diferentes tecnologías en cuanto a motores que están a la venta en España según su combustible son:

- **Gasolina:** aquellos que utilizan únicamente gasolina como combustible. Hasta la llegada del diésel, eran los más comunes, dado que a partir de motores de baja cilindrada se pueden obtener altos valores de potencia, además de tratarse de motores relativamente baratos y fiables, dado su alto grado de estandarización. Por otro lado, son los motores que más combustible consumen y los que más dióxido de carbono emiten a la atmósfera, perjudicial para el efecto invernadero.
- **Diésel:** son aquellos motores que utilizan gasóleo como combustible, un derivado del petróleo como la gasolina, lo cual hace que este combustible sea no renovable. Este tipo de motor interesa a conductores que realicen muchos kilómetros al año, dado que tiene un consumo de combustible muy bajo. Por

otro lado, son el tipo de vehículos que más óxidos de nitrógeno y partículas en suspensión producen, si bien es cierto que los filtros de partículas existentes han conseguido reducir las emisiones de partículas hasta niveles de un gasolina. Además, sus sistemas de reducción de emisiones (catalizadores y filtros de partículas principalmente) tienen poca fiabilidad si no se alcanza la temperatura normal de operación, la cual en trayectos cortos es difícil de alcanzar.

- **Eléctricos:** aquellos vehículos que sólo utilizan un motor eléctrico, el cual se recarga en un enchufe o en un poste. Este tipo de motor es perfecto para conductores que realicen trayectos en distancias cortas y tengan facilidad para su recarga. Los motores eléctricos cuentan con numerosas ventajas respecto a los motores tradicionales (gasolina y diésel) dado que no emiten ningún tipo de contaminante, el coste de la energía eléctrica para recargarlos es muy bajo, carece de todo tipo de ruidos mecánicos y tiene una respuesta instantánea hasta velocidades de 80 kilómetros por hora. Sin embargo, cuenta con varias desventajas también, principalmente debidas al estado de la tecnología, mucho más reciente que los motores tradicionales. Así, cuentan con una autonomía limitada, la cual impide realizar trayectos largos por carretera con un depósito. Además, la recarga de las baterías es muy lenta todavía (cargar el 80% de una batería requiere dos horas en un poste convencional) y el precio de las baterías es muy alto todavía, lo cual aumenta en el precio final del vehículo. Por otro lado, aunque estos motores no emitan nada de contaminación, las centrales eléctricas que producen la electricidad que utilizan como combustible sí que emiten contaminantes a la atmósfera. Por tanto, el aumento de vehículos eléctricos no implica directamente una reducción de contaminantes en la atmósfera, sino que implica una reducción de contaminantes en el centro de las ciudades.
- **Híbridos:** este tipo de vehículos cuenta con un depósito de combustible (que suele ser gasolina) y un motor eléctrico que se alimenta directamente a la red (en el caso de los híbridos enchufables, PHEV) o gracias a la energía cinética generada por el movimiento, especialmente en las frenadas (en el caso de los híbridos no enchufables, HEV). Este tipo de vehículos presenta numerosas ventajas como una transición suave hacia el vehículo eléctrico. Por un lado, tiene una mejor eficiencia que un único motor de combustión, dado que el motor térmico funciona más tiempo en el régimen en el que mejor se aprovecha el combustible, además de tener un menor consumo, dada la recuperación de energía eléctrica por la inercia del movimiento. Además, los vehículos híbridos producen menos emisiones (además de no emitir durante el funcionamiento del motor eléctrico), lo cual les permite obtener la

pegatina Cero Emisiones o ECO de la DGT, las cuales presentan numerosas ventajas para circular por Madrid. Por otra parte, esta tecnología también presenta inconvenientes, como su mayor peso al contar con dos depósitos de energía, su menor fiabilidad debida a un sistema de propulsión más complicado y que la capacidad para reducir el consumo de energía depende mucho del tipo de conducción y del estado de la vía (en atascos y a baja velocidad, un híbrido es más eficiente que un motor de combustión, dado que se aprovecha al energía de las frenadas, sin embargo en autopista será menos eficiente).

- **Gas natural comprimido (GNC):** aquellos motores que utilizan como carburante gas natural comprimido, además de poder trabajar con gasolina cuando el GNC se agote. Así, una de las mayores ventajas que presenta es que se trata de un motor de gasolina adaptado para poder funcionar con GNC, por lo que tiene una fiabilidad y sencillez similar a cualquier motor gasolina. Además, el precio del GNC es mucho menor que el de la gasolina (con 3,5€ de media, un coche GNC puede recorrer 100 kilómetros). Al poder funcionar con GNC o gasolina, estos coches poseen dos depósitos, cuyas autonomías se pueden sumar, lo que resulta en coches de gran autonomía. Las emisiones de gases contaminantes de GNC son inferiores a las de gasolina, lo cual les hace tener la etiqueta ECO, que les permite circular por Madrid incluso en casos de alta contaminación, además de estar exentos del impuesto de matriculación y pagar un impuesto de circulación menor. Por otro lado, existen muy pocos puntos de recarga de GNC (47 actualmente en toda España), la capacidad del maletero es menor, dado que los dos depósitos se ubican debajo del mismo, cada vez que pase la ITV es obligatorio presentar un certificado de estanqueidad del depósito de GNC, además de que hay que gastar la gasolina del depósito una vez cada seis meses, ya que la gasolina caduca y puede provocar daños en el sistema de inyección. Además, en vehículos que no lo lleven de serie, no se recomienda instalarlo, dado que implica gran complejidad técnicamente.
- **Gases licuados del petróleo (GLP):** al igual que en el caso de los GNC, los motores que utilizan GLP pueden utilizar también gasolina. Este combustible presenta menos ventajas que el GNC, pero existen 562 puntos de recarga (Álvaros Sauras 2019), lo cual los hacen más atractivos al público. Al ser un motor de gasolina adaptado con dos depósitos distintos, éste presenta las mismas ventajas e inconvenientes que los de GNC (motor sencillo, GLP más barato que la gasolina aunque más caro que el GNC, gran autonomía, menos emisiones, etiqueta ECO, reducción de impuestos, pocos puntos de recarga, menor capacidad del maletero, obligatorio certificado de

estanqueidad previo a la ITV). Sin embargo, éste si se puede instalar en vehículos gasolina (de inyección directa, preferiblemente) sin conllevar una extremada complejidad técnica.

### 5.3.2 Tecnologías de tratamiento de gases de escape

Aparte de intentar producir coches que no emitan gases contaminantes, como los eléctricos, los fabricantes han apostado por desarrollar tecnologías con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes al máximo posible. Mientras se desarrolla un ambiente sostenible tanto de puntos de carga como de precios asequibles para estos vehículos, los fabricantes han decidido apostar, aparte de modificar la mezcla de la combustión y la programación de las unidades de control lo cual reduciría la emisión de contaminantes, por tecnologías que traten y atrapen estos gases antes de que salgan a la atmósfera a través del tubo de escape, dada la gran complejidad para reducir su generación. Así, las principales tecnologías que se utilizan hoy en día para tratar los gases que salen del motor antes de que salgan al ambiente están basadas en filtros para retener las partículas en suspensión y convertidores catalíticos (catalizadores) en los que se producen reacciones químicas para reducir la concentración de contaminantes.

Por un lado, los catalizadores activan ciertas reacciones químicas en los gases de escape haciéndolos pasar por uno o más monolitos, los cuales contienen conductos de diámetro muy pequeño. En la superficie de estos conductos se colocan metales que realizan la función de catalizadores de las reacciones químicas mencionadas. Así, existen cuatro tipos de catalizadores:

- **Catalizadores de oxidación:** su objetivo es acelerar las reacciones de oxidación del monóxido de carbono ( $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ ) y de los hidrocarburos ( $\text{HC} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). Sin embargo, estos catalizadores no favorecen la reducción de óxidos de nitrógeno, pero sí favorecen la creación de dióxidos de nitrógeno a raíz del monóxido de carbono. Estos catalizadores se utilizan en motores diésel dado el alto contenido de oxígeno en los gases de escape, a la salida del motor, zona en la que las temperaturas están entre 100 y 550°C. El único problema que presentan es que el rendimiento del catalizador es muy bajo si la temperatura está por debajo de 200°C. Su utilización se ha implantado en combustibles con un bajo contenido en azufre, dado que éstos se desactivan por la conversión de dióxido de azufre a trióxido de azufre, el cual se acumula en el catalizador.
- **Catalizadores de reducción:** con el fin de acelerar la reacción de reducción de los óxidos de nitrógeno se necesita que no exista oxígeno en los gases de escape. Por otro lado, en una mezcla rica, la presencia de monóxido de

carbono, hidrocarburos e hidrógeno favorece la reacción. Así, un catalizador de paladio o de platino se puede comportar como uno de reducción y oxidación dependiendo de su contenido de oxígeno en los gases de escape. Además, existen estudios sobre catalizadores de reducción que se usan en mezclas pobres con diversas sustancias catalíticas en base a reacciones químicas entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, pero su rendimiento depende del material catalizador y de la relación hidrocarburos/dióxido de nitrógeno (Naturgy 2018).

Otra opción para disminuir las emisiones de óxidos de nitrógeno que existen en los gases de escape que contienen oxígeno, es utilizar sistemas de captura en forma química del óxido de nitrógeno, que se llaman Lean NO<sub>x</sub> Trapping (LNT), o un sistema de almacenamiento de estos gases, llamado NO<sub>x</sub> Storage Reduction (NSR).

- **Catalizadores de tres vías:** tienen como objetivo actuar sobre los tres gases contaminantes de los gases de escape (CO, HC y NO) de una combustión estequiométrica, de forma que los metales nobles actúen sobre estos gases acelerando los procesos de reducción del NO y de oxidación del HC y del CO.
- **Sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR, Selective Catalytic Reduction):** estos sistemas están basados en reacciones entre amoníaco, NO y NO<sub>2</sub> para dar N<sub>2</sub> más agua. Estas reacciones se activan por un catalizador en una matriz de sustrato cerámico. Dado lo peligroso que es el amoníaco, éste no se transporta en el vehículo, sino que se produce a partir de la hidrólisis de la urea, el cual es un compuesto biodegradable, no tóxico y de bajo coste. Típicamente se instala previamente un catalizador de oxidación para disminuir la concentración de CO y HC, proceso que también oxida parte del NO a NO<sub>2</sub>, como se puede ver en la siguiente imagen:

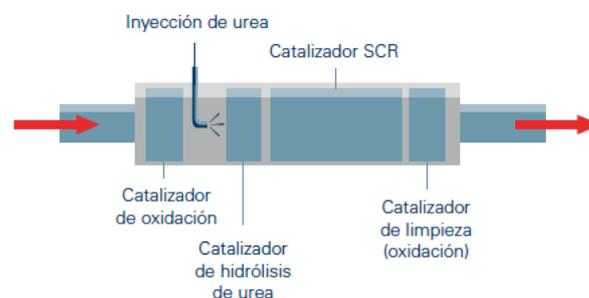


Imagen 21. Catalizador SCR con urea utilizado en motores diésel

Fuente: "La calidad del aire en las ciudades. Un reto mundial.", Naturgy

Después, se inyecta una solución acuosa al 30%-40% (AdBlue) para crear el amoníaco. Esta inyección debe realizarse con precisión, ya que un exceso

podría producir emisiones de amoniaco por los gases de escape. Así, es común instalar un catalizador de oxidación por seguridad y un sensor de amoniaco a la salida para prevenir emisiones de amoniaco en los transitorios del motor. Como se requieren tiempos de residencia lo suficientemente grandes para que ocurran los procesos químicos, los catalizadores SCR con urea son mucho más grandes que los convencionales de encendido provocado.

- **Filtros de partículas:** éstos se usan para atrapar las partículas de hollín que generan los motores diésel en mayor medida que los gasolina. Están compuestos por una estructura monolítica de un material cerámico poroso extruido equivalente al de los catalizadores, el cual cuenta con numerosos canales paralelos de sección cuadrada, estando sellado uno de los dos extremos, con el objetivo de que los gases atraviesen esta pared depositando las partículas en la superficie y en los canales interiores. La porosidad de este material esta entre el 35 y el 50% y el diámetro de los poros está entre 10 y 25 micras.

En los motores de combustión interna, coexisten dos tipos de filtrado:

- Retención de las partículas de diámetro mayor que el poro, por lo que queda retenido en el mismo.
- Retención de las partículas de diámetro menor que el poro en la superficie interna. Al penetrar estas partículas en los poros, se adhieren al material del filtro por choque, impacto o adherencia.

La relación que existe entre la contrapresión de escape y la eficiencia de filtrado se controla y ajusta durante el diseño del volumen y del espesor de las paredes, además de la porosidad y distribución de tamaño de los poros del elemento filtrante. Unos poros más pequeños producen una mejor retención de partículas, pero provoca una contrapresión de escape más grande. Según se utiliza el motor, el filtro se va llenando y la contrapresión aumenta. Cuando el filtro alcanza valores muy altos, se necesita retirar las partículas retenidas. Esta limpieza de los filtros se realiza con el motor en funcionamiento, de forma que las partículas retenidas se eliminan por combustión (llamado regeneración). Sin embargo, las cenizas, metales o sales que se producen tras la combustión no pueden ser regenerados. Para quemar las partículas los gases tienen que contener oxígeno, lo cual se produce a temperaturas mayores de 550°C. No obstante, la temperatura de los gases de escape suele ser menor, por lo que se llevan a cabo otras acciones con el fin de oxidar el hollín. Estas acciones se pueden dividir en tres tipos distintos:

- Regeneración activa aumentando la temperatura de los gases de escape en algunos periodos con estrategias de inyección a través de un calentamiento eléctrico.
- Regeneración pasiva, en la cual se produce la oxidación del hollín a bajas temperaturas debido a la deposición de material catalítico sobre la superficie del filtro, o bien se produce por la inyección de aditivos activadores en el filtro o junto al combustible.
- Regeneración en continuo (CRY, Continuous Regenerative Trapping), en la cual se utiliza el dióxido de nitrógeno que se obtiene en los gases de escape (tras oxidar el NO previamente en un catalizador de oxidación), la cual hace que se produzca la reacción:  
$$2\text{NO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{NO}$$

## 6 Medidas a tomar

Tras todo lo que ya se ha hecho en Madrid, el objetivo de este trabajo de fin de máster es proponer medidas sobre el parque de vehículos que mejoren la calidad del aire desde un punto de vista ingenieril. Como se ha mencionado previamente, los dos mayores responsables que deben tomar medidas sobre éstos son la administración (gobiernos municipales, autonómicos y nacionales) y los propios fabricantes de vehículos.

### 6.1 Administración

Los gobiernos pueden tomar dos tipos de medidas sobre el parque de vehículos actual: directas, las cuales recaen sobre los vehículos que son propiedad del ayuntamiento o del estado, e indirectas, las cuales se corresponden con la limitación del tráfico de la ciudad mediante leyes o políticas que lleven a cabo los gobiernos para modificar la estructura del parque de vehículos actual.

#### 6.1.1 Medidas directas

##### 6.1.1.1 Transformar la flota municipal en eléctrica

La primera medida que depende del consistorio municipal es la transformación de las flotas de vehículos municipales convencionales a nuevas flotas eléctricas no contaminantes. Como se puede observar en el apartado 4.1, el 12,1% (242 vehículos) aún no disponen de etiqueta, lo cual implica que no cumplen con los niveles de contaminación EURO 3. El objetivo del ayuntamiento debería ser reducir estos vehículos (que son los más contaminantes del parque) a cero en un plazo corto pero factible de tiempo.

Para mostrar la importancia de esta medida, se ha realizado una estimación de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas en suspensión que esta medida traería. Para ello, se han realizado las siguientes suposiciones:

- Todos los vehículos realizan una media de 50.000 km al año.
- Se han asumido unos consumos medios para cada tipo de vehículo, los cuales se presentan en la siguiente tabla.
- Para la estimación de CO<sub>2</sub> se ha utilizado una media entre los kilogramos de CO<sub>2</sub> por litro de combustible según sea gasolina (2,3 kg CO<sub>2</sub>/litro de combustible) o diésel (2,6 kg CO<sub>2</sub>/litro combustible), resultando un valor de 2,45 kg CO<sub>2</sub>/litro combustible.

- Para la estimación de emisiones de NO<sub>x</sub> y PM, se han utilizado los valores límite de la normativa EURO 3, dado que si no la cumplen, sus emisiones mínimas serán los límites de esta normativa.

Así, la estimación para cada contaminante se muestra a continuación:

<b>Vehículo</b>	<b>Número</b>	<b>Km/año</b>	<b>Consumo (L/100km)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/L combustible</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>/año</b>
Turismos	38	50.000	10	2,45	465.500
Furgonetas	42	50.000	15	2,45	771.750
Camiones	63	50.000	20	2,45	1.543.500
Especiales	50	50.000	10	2,45	612.500
Motos	17	50.000	5	2,45	104.125
Autobuses	23	50.000	20	2,45	563.500
Todoterrenos	4	50.000	15	2,45	73.500
Ambulancias	5	50.000	20	2,45	122.500
<b>TOTAL</b>					<b>4.256.875</b>

Tabla 16. Emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos sin distintivo propiedad del ayuntamiento de Madrid  
Fuente: Elaboración propia

<b>Vehículo</b>	<b>Número</b>	<b>Km/año</b>	<b>NO<sub>x</sub> (g/km)</b>	<b>g NO<sub>x</sub>/año</b>	<b>kg NO<sub>x</sub>/año</b>
Turismos	38	50.000	0,50	950.000	950
Furgonetas	42	50.000	0,50	1.050.000	1.050
Camiones	63	50.000	0,50	1.575.000	1.575
Especiales	50	50.000	0,50	1.250.000	1.250
Motos	17	50.000	0,50	425.000	425
Autobuses	23	50.000	0,50	575.000	575
Todoterrenos	4	50.000	0,50	100.000	100
Ambulancias	5	50.000	0,50	125000	125
<b>TOTAL</b>				<b>6.050.000</b>	<b>6.050</b>

Tabla 17. Emisiones de NO<sub>x</sub> de los vehículos sin distintivo propiedad del ayuntamiento de Madrid  
Fuente: Elaboración propia

<b>Vehículo</b>	<b>Número</b>	<b>Km/año</b>	<b>PM (g/km)</b>	<b>g PM/año</b>	<b>kg PM/año</b>
Turismos	38	50.000	0,05	95.000	95
Furgonetas	42	50.000	0,05	105.000	105
Camiones	63	50.000	0,05	157.500	158
Especiales	50	50.000	0,05	125.000	125
Motos	17	50.000	0,05	42.500	43
Autobuses	23	50.000	0,05	57.500	58
Todoterrenos	4	50.000	0,05	10.000	10
Ambulancias	5	50.000	0,05	12.500	13
			<b>TOTAL</b>	<b>605.000</b>	<b>605</b>

*Tabla 18. Emisiones de partículas en suspensión de los vehículos sin distintivo propiedad del ayuntamiento de Madrid  
Fuente: Elaboración propia*

Con la nueva flota eléctrica se podrían ahorrar alrededor de 4.256.875 kg de CO<sub>2</sub>, 6.050 kg de NO<sub>x</sub> y 605 kg de partículas en suspensión.

### 6.1.2 Medidas indirectas

Las medidas indirectas llevadas a cabo por la administración pueden ser de dos tipos.

Por un lado, son aquellas promovidas por los gobiernos de forma que fomenten el aumento del porcentaje de vehículos no contaminantes dentro del parque de vehículos de Madrid. Además, estas medidas podrían considerarse medidas preventivas, ya que van al origen del problema y previenen la emisión de gases contaminantes dentro de la ciudad.

Por otro lado, son aquellas que intentan disminuir los niveles de contaminación reduciendo el número de coches contaminantes en aquellas zonas con mayores niveles de contaminación. Estas medidas podrían considerarse medidas paliativas, las cuales son necesarias ante la necesidad a corto plazo de disminuir dichos niveles.

Así, las medidas de cada tipo que se proponen son las siguientes:

#### 6.1.2.1 Medidas para fomentar la renovación del parque en la transición hacia los vehículos eléctricos

El primer objetivo de la administración debe ser prohibir la circulación de los vehículos más contaminantes, más concretamente, se propone prohibir los vehículos sin etiqueta dentro de la M-30 en 2024 (un plan a cinco años desde 2020),

como están haciendo en otros países. Para ello, se propone el siguiente paquete de medidas:

- **Reducción de impuestos para fomentar la compra de coches eléctricos** (IVA, Impuesto de vehículos de tracción mecánica, IRPF...): el estado debe hacer un esfuerzo económico para que los ciudadanos puedan adquirir coches no contaminantes. Así, se propone que la administración, tanto estatal como municipal, deben facilitar la compra de estos vehículos a través de la reducción de impuestos a quienes se decidan por comprar vehículos eléctricos.
- **Aumento de puntos de carga en la ciudad de Madrid:** también es imprescindible que el estado vaya dando pasos en la transición hacia el coche eléctrico. Mucha gente no adquiere estos vehículos por falta de puntos de recarga y por la incertidumbre que ello genera. Así, el estado/ayuntamiento debe apostar por esta tecnología invirtiendo dinero en implantar puntos de recarga de electricidad, o incluso fomentando las electrolineras.
- **Plan de ayudas para la compra de nuevos coches eléctricos:** la administración debe proveer ayudas económicas a aquellos que quieran reciclar su antiguo vehículo por uno eléctrico. Así, deberían ofrecer ventajas a aquellos que devuelvan su antiguo vehículo (con mayores ayudas a aquellos que devuelva vehículos con mayores emisiones). Dentro de esta medida, se ha realizado una estimación del dinero necesario para este plan, para la cual se han realizado las siguientes hipótesis:
  - o El estado proporciona 5.000 euros de media por vehículo en función de sus emisiones.
  - o Se pretende cambiar el 100% de los vehículos del parque circulante de Madrid que circulan dentro de la M-30 sin distintivo (de las 1.777.065 matrículas que circulan por Madrid, el 17,4% lo hacen en la zona A, 309.209 vehículos, de los cuales, el 13,4% no tienen distintivo, 41.465 vehículos).Así, la administración (estado, comunidad y municipio) necesitan desarrollar un plan de más de 207 millones de euros (207.324.842 euros exactamente) para conseguir reducir a cero el número de vehículos sin distintivo que circulan por dentro de la M-30. Si el objetivo a cinco años es prohibir el uso de vehículos sin distintivo, implicaría que el gobierno debería destinar una partida de alrededor de 40 millones de euros al año sólo para la ciudad de Madrid.
- **Aumento de impuestos a los combustibles diésel y gasolina:** con el fin de desincentivar el uso de combustibles fósiles, se podría añadir un impuesto a

los combustibles diésel y gasolina cuyo fin directo sea la renovación del parque circulante, es decir, que este impuesto se destine directamente al plan de ayudas mencionado anteriormente para la compra de nuevos coches eléctricos.

- **Reducción del impuesto de sociedades a empresas que fomenten el uso del coche eléctrico:** los gobiernos deberían reducir el impuesto de sociedades a aquellas empresas que cambien sus flotas de vehículos a vehículos eléctricos y que instalen puntos de recarga en sus oficinas (un ratio de puntos de carga por personas empleadas) entre el 1 y el 5%, en función de su reducción de emisiones. Aquellas empresas que más emisiones reduzcan debidas al cambio de flota y al número de vehículos eléctricos de sus empleados, recibirán mayores descuentos en este tipo de impuesto. El objetivo es que las empresas dediquen parte del dinero que antes empleaban en el impuesto de sociedades a que sus empleados conduzcan vehículos menos contaminantes.

En definitiva, la administración debería enfocarse en las empresas y particulares, promoviendo facilidades para la transición hacia el coche eléctrico.

#### 6.1.2.2 *Medidas que prohíben el uso de los coches más contaminantes y reducen el tráfico*

El siguiente objetivo de la administración debe ser reducir el altísimo número de vehículos que circulan en el centro de Madrid (dentro de la M-30). Para ello se proponen las siguientes medidas:

- **Mantener Madrid Central:** es imprescindible limitar el uso de los vehículos más contaminantes allí donde su concentración es mayor, como es en el centro de Madrid. Todas las ciudades grandes europeas están limitando el tráfico en el centro de sus ciudades y Madrid no debe ser menos, dados los altos niveles de contaminación que sufre. Además, el radio de esta zona de bajas emisiones se debe ir agrandando progresivamente por el bien de la salud de todos los ciudadanos.
- **Reducción de circulación de taxis:** la huelga de taxis que ocurrió en enero de 2019 en Madrid expuso grandes beneficios en cuanto al tráfico y a la contaminación en Madrid. La desaparición de la circulación de los más de 17.000 taxis existentes en Madrid mejoró la fluidez del tráfico de la capital. Estos vehículos realizan 200 kilómetros diarios estando vacíos más de la mitad del trayecto total (113 kilómetros, un 54,6%), provocando altos niveles de contaminación totalmente evitables. Con el fin de evitar estos

trayectos sin clientes, se propone que la contratación de este servicio sea bajo demanda (vía aplicación, como los vehículos con conductor Uber y Cabify). Así, los taxis no podrían circular vacíos a no ser que se encuentren circulando hacia un cliente que les haya contactado previamente. Esta medida provocaría tiempos de espera más largos pero una reducción bastante considerable de emisiones contaminantes.

- **Construcción de aparcamientos disuasorios en las afueras de la ciudad:** el Plan A diseñado por Manuela Carmena propone la construcción de 10 aparcamientos disuasorios en la corona de la M-40 para evitar el uso del coche hacia el centro de Madrid. Sin embargo, ninguno de ellos se ha llevado a cabo todavía. Esta medida es muy común en otras ciudades grandes del mundo y es de vital importancia para reducir el tráfico de entrada y salida de Madrid. Estos aparcamientos se deben encontrar en estaciones de tren (Metro/Cercanías) que estén bien conectadas con el centro de la ciudad. Además, su uso debería ser gratuito para todas aquellas personas que dispongan de un billete o abono de tren, lo cual fomentaría el uso de transporte público.
- **Fomentar el uso de coches y motos compartidos:** hoy en día existen aplicaciones de coches y motos eléctricos que pueden ser compartidos por distintos conductores. Este tipo de vehículos debería fomentarse más, incluso llegando a recibir dinero de la administración para que sea asequible para los conductores. Cada vez que alguien utiliza estos medios de transporte evita el uso de su vehículo, evitando la contaminación de éste y la existencia de un vehículo más en marcha.
- **Fomentar el transporte público con abonos asequibles:** por último, pero no por ello menos importante, la administración debe fomentar el uso del transporte público con mejores precios y más frecuencia en las horas punta del día. De hecho, esta medida es la más importante, ya que una gran cantidad de vehículos en circulación son ocupados por una persona, especialmente en las horas punta, lo cual causa grandes atascos y una gran cantidad de contaminación. Se podría valorar incluso penalizar a aquellos conductores que viajen solos, a la vez que premiar a aquellos vehículos ocupados por dos o más personas (vehículos de alta ocupación).

Por último, también se debería intentar reducir la detención de vehículos en la entrada y salida de la ciudad (sobre todo en horas punta). Así, se deberían identificar las calles grandes que sirven de entrada y salida de la ciudad para estudiar una nueva regulación semafórica que favorezca el movimiento en estas vías, deteniendo

los vehículos lo mínimo posible, ya que la aceleración de estos implica una gran cantidad de contaminación, como se probará más adelante.

### 6.1.2.3 Conclusiones

En conclusión, la administración debe tener como prioridad la reducción de contaminantes sobretodo en las grandes ciudades, dadas las amenazas de multa de la Unión Europea para favorecer la salud de los ciudadanos. Así, debe tomar medidas estrictas y desarrollar un plan a largo plazo acordado por la mayoría de partidos políticos para así evitar modificaciones cada cuatro años. Por tanto, existe una gran necesidad de un plan nacional (aparte de los municipales) de ayudas para la compra de vehículos eléctricos e híbridos, además de puntos de recarga. Además, es necesario concienciar a la gente (especialmente a los jóvenes desde los colegios) del uso del transporte público para reducir la contaminación en el largo plazo.

Es cierto que este plan debe tener un presupuesto muy alto, ya que todo cambio medioambiental conlleva un gran coste. Sin embargo, este plan es totalmente necesario por el bien del planeta y de la salud de las personas.

Por otro lado, también se debe concienciar a la gente de que hay que reducir el uso de coches de una persona, a no ser que sean coches pequeños no contaminantes, tanto por salud como por espacio.

En una ciudad ideal creada desde cero, lo más eficiente sería construir diferentes niveles para circular, existiendo un nivel superior para las personas, un segundo nivel para trayectos cortos y un tercer nivel para entrar y salir de la ciudad. Estos niveles reducirían las paradas de los vehículos (las cuales conllevan un alto grado de contaminación) y se podrían equipar con dispositivos que atraparán los contaminantes, como filtros de partículas. La eficacia de estos niveles es comparable a los túneles existentes en Madrid de salida de la ciudad (como puede ser el túnel de salida hacia la A-2 o los túneles de la M-30 en el sur de la ciudad).

## 6.2 Fabricantes

Por otro lado, los fabricantes pueden realizar modificaciones en el interior de los vehículos, para reducir los gases contaminantes emitidos, las cuales se pueden programar en la unidad de control del motor (ECU).

### 6.2.1 Limitar velocidad en ciudad para disminuir el CO2 emitido

Por un lado, se propone limitar la velocidad de los vehículos electrónicamente a 60 kilómetros por hora dentro de la ciudad. Para soportar esta medida, se ha realizado

un modelo que calcula las emisiones de gases CO<sub>2</sub> de un vehículo para distintas velocidades. El procedimiento a seguir se detalla a continuación.

Para conocer las emisiones de CO<sub>2</sub> de un vehículo, primero se necesita calcular su consumo de combustible. Para ello, necesitamos el mapa de motor del vehículo, que puede venir en unidades de par del motor, potencia o presión media efectiva (PME). En este caso se utilizará el mapa de motor de un Volkswagen Passat 1.6 TDI 90 CV (el resto de datos también se supondrán de este vehículo), el cual se muestra en la siguiente figura en función de la presión media efectiva (bmep en la gráfica por sus siglas en inglés, Brake Mean Effective Pressure). Todos los puntos de operación que se encuentren por encima de la línea en negrita no se pueden alcanzar, dado que el motor no tiene la potencia necesaria.

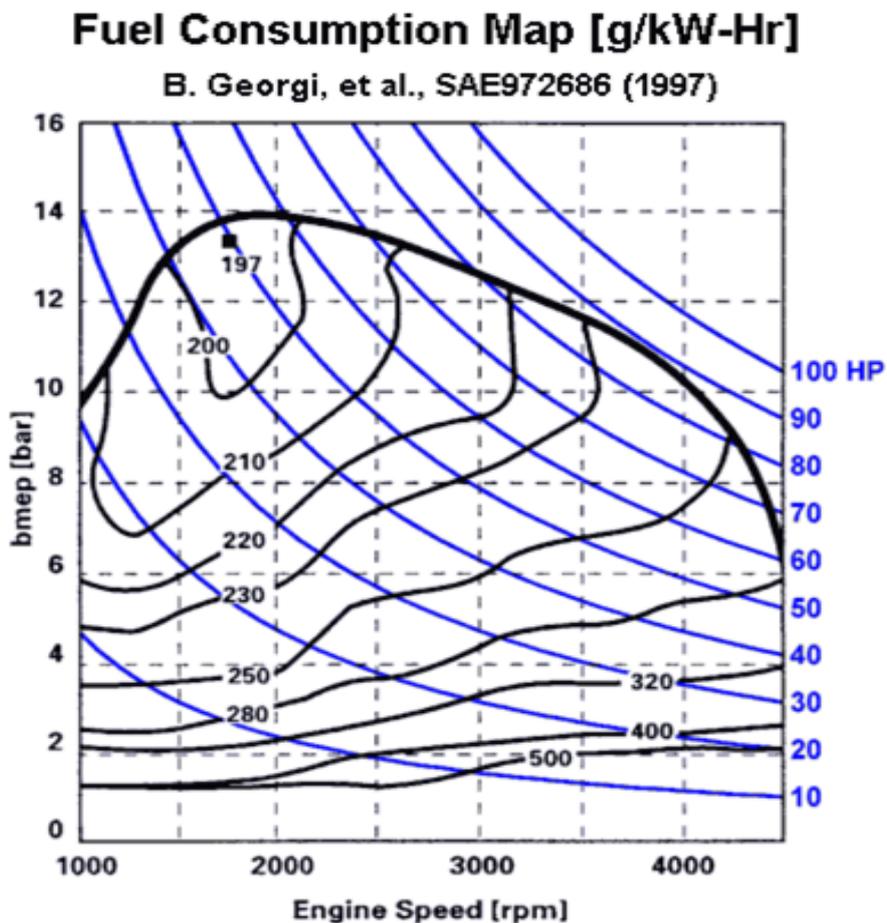


Imagen 22. Mapa de motor de un Volkswagen Passat 1.6 TDI 90 CV

Fuente: B. Georgi, et al. SAE972686 (1997)

Así, con la presión media efectiva y las revoluciones por minuto del motor (rpm) en un punto de operación, se puede calcular el consumo de combustible específico, el cual se muestra en la gráfica en gramos por kilovatio hora.

Para poder entrar en la gráfica se deben definir por tanto, la presión media efectiva y las revoluciones por minuto, las cuales se obtienen de la siguiente manera:

Por un lado, la presión media efectiva se calcula a través de la potencia requerida al motor, que a su vez se calcula conociendo la potencia demandada en las ruedas, que a su vez se calculan conociendo las fuerzas que actúan sobre las ruedas del vehículo, que son las que se muestran en la siguiente imagen:

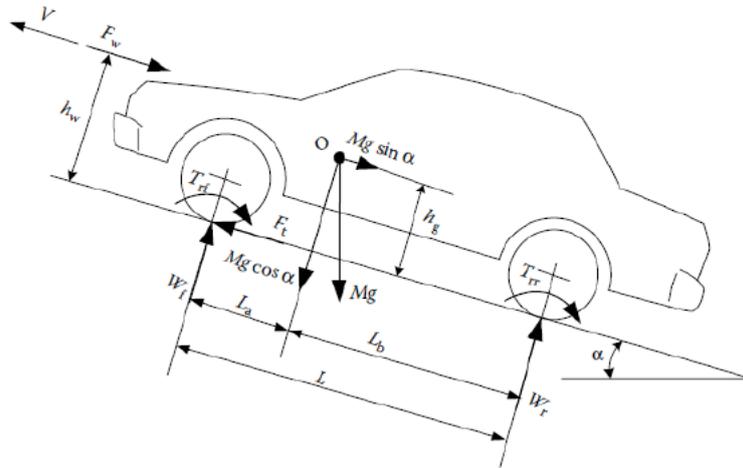


Imagen 23. Fuerzas que actúan sobre las ruedas de un coche

Fuente: Apuntes de la asignatura de Motores térmicos, Juan Norverto

Así, las fuerzas que actúan sobre las ruedas del coche son:

- **Fuerza aerodinámica:** es aquella fuerza contraria al movimiento del vehículo cuando se desplaza a través del aire. Su valor será mayor cuanto mayor sea la superficie frontal del vehículo, en dirección perpendicular a la dirección del viento. Esta fuerza se calcula de la siguiente forma:

$$F_{aerod.} = \frac{1}{2} \times \rho_{aire} \times C_x \times A_{fp} \times V^2$$

Siendo:

- $\rho_{aire}$ : densidad del aire, con un valor de 1,2 kg/m<sup>3</sup>.
- $C_x$ : coeficiente aerodinámico del aire en dicha dirección, con un valor de 0,35 por la morfología del vehículo seleccionado.
- $A_{fp}$ : área frontal proyectada, siendo de 2,35m<sup>2</sup>
- $V$ : velocidad del vehículo, la cual se modificará en la simulación realizada.

- **Fuerza de rodadura:** es aquella fuerza que aparece cuando un cuerpo rueda sobre otro, produciéndose un rozamiento u oposición. Se calcula de la siguiente forma:

$$F_{rodad.} = f \times m \times g \times \cos \alpha$$

Siendo:

- $f$ : coeficiente de rodadura, con un valor de 0,015 para la simulación.
  - $m$ : masa del vehículo, 1500 kg en este caso.
  - $g$ : aceleración de la gravedad, siendo 9,81 m/s<sup>2</sup>.
  - $\alpha$ : inclinación de la superficie, que en este caso será 0.
- **Fuerza debida a la inclinación:** aquella que surge cuando un vehículo circula sobre una superficie inclinada. En la simulación se supondrá una superficie plana sin inclinación, por lo que esta fuerza será cero. Sin embargo, se calcula así:

$$F_{incl.} = m \times g \times \sin \alpha$$

- **Fuerza debida a la aceleración:** es aquella que surge por la aceleración de un cuerpo. En esta primera simulación, se supondrá que la aceleración es cero. Sin embargo, en el siguiente apartado se modificarán las aceleraciones para ver su impacto. Esta fuerza se calcula de la siguiente manera:

$$F_{accel.} = m^* \times a$$

Siendo:

- $m^*$ : masa equivalente del vehículo, la cual es una masa mayorada con un factor corrector de 1,3. Este factor de masas es necesario debido a que existen masas rotativas que absorben energía cinética sin que se convierta en energía de traslación (las ruedas, por ejemplo).
- $a$ : aceleración del vehículo, que en este caso será cero. Esto implica que esta fuerza será cero durante toda la simulación, por lo que directamente se omitirá en los resultados.

Así, una vez conocidas las fuerzas en un punto de operación, se realiza el sumatorio de todas ellas, el cual se debe multiplicar por la velocidad para calcular la potencia demandada por las ruedas. Además, se debe añadir la potencia demandada para accesorios, como pueden ser todos los aparatos electrónicos (ruedas, luces, etc.). en esta simulación la potencia de los accesorios se supondrá que es cero. Así, para calcular la potencia en rueda, se utilizará la siguiente fórmula:

$$Potencia_{rueda} = \sum Fuerzas_{rueda} \times Velocidad + Potencia_{accesorios} (kW)$$

Una vez conocida la potencia en rueda en kilovatios, se calcula la potencia que requiere el motor utilizando el rendimiento de la transmisión, que suele estar entre 0,9 y 0,95. En este caso se utilizará un rendimiento de 0,9. La potencia demandada por el motor se calcula así:

$$Potencia_{motor} = \frac{Potencia_{rueda}}{\eta_{transmisión}}$$

Conocida la potencia requerida en el motor, que será levemente mayor que la demandada en las ruedas, a continuación, se calculan la velocidad de giro del motor (en revoluciones por minuto), el par motor y la presión media efectiva mediante las siguientes fórmulas:

- **Velocidad de giro del motor (n):**

$$n = Velocidad \text{ giro motor} = \frac{Velocidad_{vehículo}}{relacion_{transmisión}}$$

Siendo la relación de transmisión el valor de los desarrollos del cambio, que se refiere a la velocidad que lleva el vehículo en kilómetros por hora cuando alcanza 1000 rpm en una marcha dada. A mayor marcha, mayor será la relación de transmisión y menor será la velocidad de giro del motor, para una velocidad del vehículo dada. Los desarrollos del cambio para las cinco marchas del vehículo tipo son:

Marcha	Velocidad a 1000 rpm en km/h
1	7
2	12
3	19
4	29
5	43

Tabla 19. Desarrollos del cambio para el vehículo de la simulación

Fuente: Elaboración propia

- **Par motor:**

$$Par \text{ motor} = \frac{Potencia_{motor} (W)}{2 \times \pi \times n (Hz)} (Nm)$$

- **Presión media efectiva:**

$$PME = \frac{Potencia_{motor}(W)}{Cilindrada (m^3) \times n (Hz) \times i} (Nm)$$

Siendo  $i$  el factor de ciclo del motor, que es 0,5 para motores de cuatro tiempos y 1 para motores de dos tiempos. En este caso, será de 0,5, dado que se utiliza un motor de cuatro tiempos. Además, la cilindrada será de 1600 cc (0,0016 m<sup>3</sup>).

Una vez conocido el valor específico de la presión media efectiva y de la velocidad de giro del motor, se extrae de la gráfica de la imagen 21 el consumo de combustible específico en cada punto de operación, el cual muestra cuántos gramos de combustible necesita consumir un motor cada hora para proporcionar un kilovatio de potencia. Con este dato se calcula el consumo de combustible total y los gramos de CO<sub>2</sub> emitidos con las siguientes fórmulas:

- **Consumo de combustible:**

$$Consumo\ combustible \left(\frac{g}{h}\right) = Consumo\ específico \left(\frac{g}{kWh}\right) \times Potencia_{motor}(kW)$$

$$Consumo \left(\frac{l}{100\ km}\right) = \frac{Consumo \left(\frac{g}{h}\right)}{10 \times Densidad_{comb} \left(\frac{kg}{l}\right) \times Velocidad \left(\frac{km}{h}\right)}$$

Siendo la densidad del combustible 0,87 kg/l para el diésel, el combustible del vehículo utilizado para la simulación.

- **Emisiones de CO<sub>2</sub>:**

$$Emisiones\ CO_2 \left(\frac{g}{km}\right) = Consumo \left(\frac{l}{100\ km}\right) \times CO_2\ emitido \left(\frac{kg\ CO_2}{l\ gasoil}\right) \times 10$$

Siendo el CO<sub>2</sub> emitido en un motor diésel de 2,6 kg de CO<sub>2</sub> por cada litro de combustible.

Con estas fórmulas, se realizan dos simulaciones. En primer lugar, se simulará un incremento de velocidad dentro de una misma marcha para comprobar cómo aumenta el nivel de emisiones al aumentar la velocidad. En segundo lugar, se simulará un incremento de velocidad con cambios de marcha para ver cómo varían dichas emisiones.

Para la primera simulación, se han utilizado cinco velocidades distintas (30, 40, 50, 60 y 70 km/h) en una misma marcha (tercera). Los resultados obtenidos han sido los siguientes:

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>F rodadura (N)</b>	<b>F aerodinám. (N)</b>	<b>P rueda (kW)</b>	<b>P rueda (CV)</b>	<b>P motor (kW)</b>	<b>P motor (CV)</b>
30	220,73	34,27	2,12	2,89	2,36	3,21
40	220,73	60,93	3,13	4,25	3,48	4,72
50	220,73	95,20	4,39	5,96	4,88	6,62
60	220,73	137,08	5,96	8,10	6,63	9,00
70	220,73	186,59	7,92	10,76	8,80	11,96

Tabla 20. Cálculo de potencias requeridas en motor para la simulación 1

Fuente: Elaboración propia

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Marcha</b>	<b>Potencia motor (kW)</b>	<b>Revoluciones (rpm)</b>	<b>Par motor (Nm)</b>	<b>PME (bar)</b>
30	3	2,36	1579	14,3	1,12
40	3	3,48	2105	15,8	1,24
50	3	4,88	2632	17,7	1,39
60	3	6,63	3158	20,0	1,57
70	3	8,80	3684	22,8	1,79

Tabla 21. Cálculo de la presión media efectiva para la simulación 1

Fuente: Elaboración propia

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Consumo específico (g/kWh)</b>	<b>Consumo (g/h)</b>	<b>Consumo (l/100 km)</b>	<b>Emisiones CO2 (g/km)</b>
30	500	1181	4,52	117,6
40	490	1704	4,90	127,3
50	480	2340	5,38	139,9
60	530	3512	6,73	174,9
70	540	4752	7,80	202,9

Tabla 22. Cálculo de emisiones de CO2 durante la simulación 1

Fuente: Elaboración propia

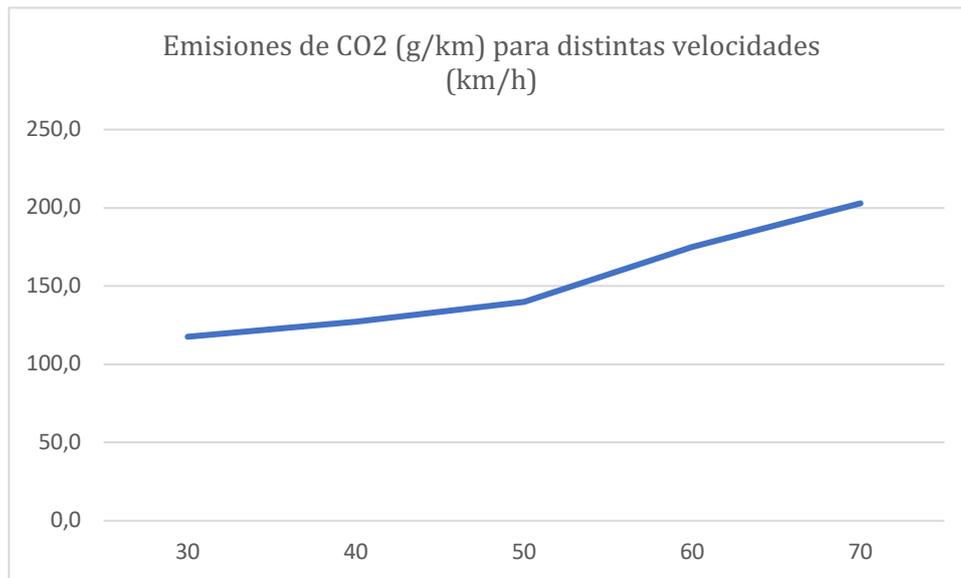


Imagen 24. Gráfica de emisiones de CO2 en la simulación 1

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica, las emisiones aumentan cuantiosamente según aumenta la velocidad en una misma marcha, por lo que limitar electrónicamente la velocidad a 60 km/h en ciudad parece una medida razonable para reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera de la ciudad de Madrid.

Por otro lado, se ha realizado una segunda simulación para ver qué impacto tiene el cambio de marchas en las emisiones de los vehículos según aumenta la velocidad. Los resultados de esta simulación se presentan a continuación:

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>F rodadura (N)</b>	<b>F aerodinám. (N)</b>	<b>P rueda (kW)</b>	<b>P rueda (CV)</b>	<b>P motor (kW)</b>	<b>P motor (CV)</b>
20	220,73	15,23	1,31	1,78	1,46	1,98
30	220,73	34,27	2,12	2,89	2,36	3,21
40	220,73	60,93	3,13	4,25	3,48	4,72
50	220,73	95,20	4,39	5,96	4,88	6,62
60	220,73	137,08	5,96	8,10	6,63	9,00
70	220,73	186,59	7,92	10,76	8,80	11,96
80	220,73	243,70	10,32	14,02	11,47	15,58
90	220,73	308,44	13,23	17,97	14,70	19,97
100	220,73	380,79	16,71	22,70	18,57	25,22

Tabla 23. Cálculo de potencias requeridas en motor para la simulación 2

Fuente: Elaboración propia

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Marcha</b>	<b>Potencia motor (kW)</b>	<b>Revoluciones (rpm)</b>	<b>Par motor (Nm)</b>	<b>PME (bar)</b>
20	2	1,46	1667	8,3	0,66
30	2	2,36	2500	9,0	0,71
40	2	3,48	3333	10,0	0,78
50	3	4,88	2632	17,7	1,39
60	3	6,63	3158	20,0	1,57
70	3	8,80	3684	22,8	1,79
80	4	11,47	2759	39,7	3,12
90	4	14,70	3103	45,2	3,55
100	4	18,57	3448	51,4	4,04

Tabla 24. Cálculo de la presión media efectiva para la simulación 2

Fuente: Elaboración propia

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Consumo específico (g/kWh)</b>	<b>Consumo (g/h)</b>	<b>Consumo (l/100 km)</b>	<b>Emisiones CO2 (g/km)</b>
20	700	1020	5,86	152,3
30	810	1912	7,33	190,5
40	850	2956	8,49	220,8
50	500	2438	5,60	145,7
60	550	3644	6,98	181,5
70	560	4928	8,09	210,4
80	300	3440	4,94	128,5
90	320	4704	6,01	156,2
100	320	5941	6,83	177,5

Tabla 25. Cálculo de emisiones de CO2 durante la simulación 2

Fuente: Elaboración propia

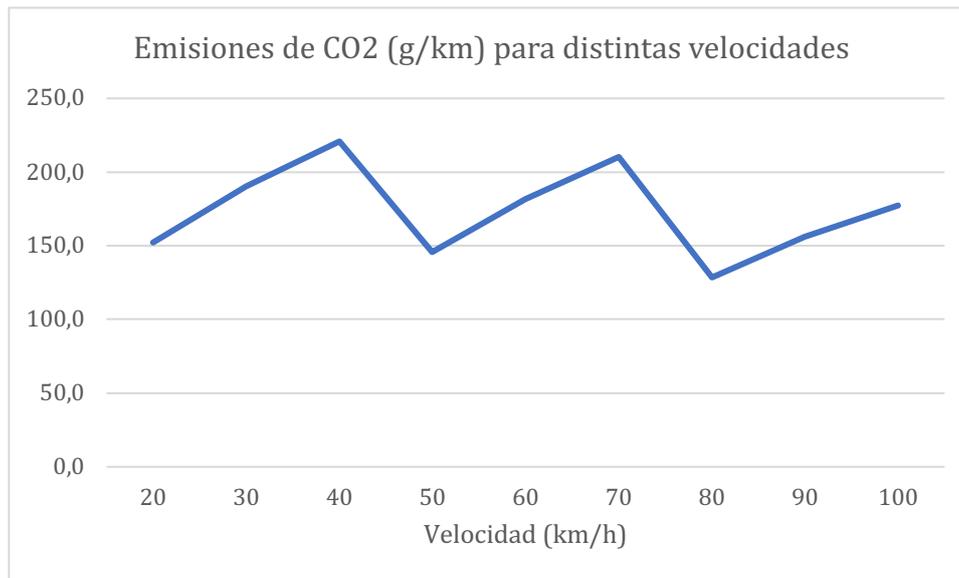


Imagen 25. Gráfica de emisiones de CO2 en la simulación 2

Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se puede observar el mismo fenómeno que en la simulación 1, que al aumentar la velocidad manteniendo una marcha fija, las emisiones aumentan. Además, se puede observar que, al subir una marcha mientras aumenta la velocidad, las emisiones caen en picado, lo cual implica que una conducción eficaz (por parte del conductor o de una caja de cambios inteligente) puede reducir las emisiones de CO2 en gran medida. También se puede ver cómo las mínimas emisiones aparecen a bajas revoluciones por minuto y a altas velocidades (a 80km/h se emite menos que a 20 km/h), lo cual implica que se debería evitar al máximo que los vehículos se detengan y/o reduzcan la velocidad, siempre manteniendo unos límites seguros para la ciudadanía. Este hecho ayuda a la medida expuesta en el apartado anterior sobre la importancia de tener circunvalaciones o distintos niveles de conducción, donde los vehículos se detengan lo menos posible.

### 6.2.2 Limitar la aceleración de los vehículos para disminuir el CO2 emitido

Una vez demostrado que la limitación electrónica de la velocidad en los vehículos reduciría la emisión de gases de CO2 a la atmósfera, limitar la aceleración de los mismos también supondría una reducción de emisiones. Por ello, se propone limitar la aceleración de los vehículos electrónicamente hasta el 30% de la aceleración máxima. Para demostrar la importancia de esta medida, se han realizado varias simulaciones modificando las aceleraciones (10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60% de la aceleración máxima) para tres velocidades (30km/h en segunda, 50 km/h en tercera y 70 km/h en cuarta velocidad).

Para el valor de la aceleración máxima se ha supuesto que el vehículo alcanza los 100 km/h desde el reposo en 10 segundos, lo cual implica una aceleración máxima de 2,7 m/s<sup>2</sup>. Este valor se supondrá como el 100% de aceleración del vehículo (pedal acelerador al máximo). La existencia de una aceleración implicará la existencia de una fuerza, la cual no debe ser despreciada en absoluto, llegando a ser hasta el 88% de las fuerzas totales que actúan sobre el coche. Este aumento de fuerzas sobre el vehículo implicará que se demande más potencia al motor, lo cual provocará valores de presión media efectiva mucho mayores que en el anterior caso. Así, los resultados de la simulación han sido los siguientes:

<b>Veloc. (km/h)</b>	<b>Acel. (%)</b>	<b>Acel. (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>F rodadura (N)</b>	<b>F aerodinám. (N)</b>	<b>F aceleración (N)</b>	<b>F total (N)</b>	<b>P rueda (kW)</b>	<b>P motor (kW)</b>
30	10	0,27	220,7	34,3	526,5	781,5	6,51	7,24
	20	0,54	220,7	34,3	1053,0	1308,0	10,90	12,11
	30	0,81	220,7	34,3	1579,5	1834,5	15,29	16,99
	40	1,08	220,7	34,3	2106,0	2361,0	19,67	21,86
	50	1,35	220,7	34,3	2632,5	2887,5	24,06	26,74
	60	1,62	220,7	34,3	3159,0	3414,0	28,45	31,61
50	10	0,27	220,7	95,2	526,5	842,4	11,70	13,00
	20	0,54	220,7	95,2	1053,0	1368,9	19,01	21,13
	30	0,81	220,7	95,2	1579,5	1895,4	26,33	29,25
	40	1,08	220,7	95,2	2106,0	2421,9	33,64	37,38
	50	1,35	220,7	95,2	2632,5	2948,4	40,95	45,50
	60	1,62	220,7	95,2	3159,0	3474,9	48,26	53,63
70	10	0,27	220,7	186,6	526,5	933,8	18,16	20,17
	20	0,54	220,7	186,6	1053,0	1460,3	28,39	31,55
	30	0,81	220,7	186,6	1579,5	1986,8	38,63	42,92
	40	1,08	220,7	186,6	2106,0	2513,3	48,87	54,30
	50	1,35	220,7	186,6	2632,5	3039,8	59,11	65,67
	60	1,62	220,7	186,6	3159,0	3566,3	69,34	77,05

Tabla 26. Cálculo de la potencia demandada al motor en la simulación 3

Fuente: Elaboración propia

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Aceleración (%)</b>	<b>Potencia motor (kW)</b>	<b>Revoluciones (rpm)</b>	<b>Par motor (Nm)</b>	<b>PME (bar)</b>
30	0,10	7,24	2500	27,6	2,2
	0,20	12,11	2500	46,3	3,6
	0,30	16,99	2500	64,9	5,1
	0,40	21,86	2500	83,5	6,6
	0,50	26,74	2500	102,1	8,0
	0,60	31,61	2500	120,7	9,5
50	0,10	13,00	2632	47,2	3,7
	0,20	21,13	2632	76,7	6,0
	0,30	29,25	2632	106,1	8,3
	0,40	37,38	2632	135,6	10,7
	0,50	45,50	2632	165,1	13,0
	0,60	53,63	2632	194,6	15,3
70	0,10	20,17	2414	79,8	6,3
	0,20	31,55	2414	124,8	9,8
	0,30	42,92	2414	169,8	13,3
	0,40	54,30	2414	214,8	16,9
	0,50	65,67	2414	259,8	20,4
	0,60	77,05	2414	304,8	23,9

Tabla 27. Cálculo de la presión media efectiva en la simulación 3

Fuente: Elaboración propia

<b>Velocidad (km/h)</b>	<b>Aceleración (%)</b>	<b>Consumo esp. (g/kWh)</b>	<b>Consumo (g/h)</b>	<b>Consumo (l/100 km)</b>	<b>Emisiones CO2 (g/km)</b>
30	10	380	2749,71	10,5	273,9
	20	280	3391,10	13,0	337,8
	30	255	4331,45	16,6	431,5
	40	235	5137,35	19,7	511,8
	50	225	6015,62	23,0	599,3
	60	215	6796,38	26,0	677,0
50	10	285	3705,10	8,5	221,5
	20	245	5175,71	11,9	309,4
	30	225	6581,33	15,1	393,4
	40	212	7923,57	18,2	473,6
	50	210	9555,07	22,0	571,1
	60	210*	11261,32	25,9	673,1
70	10	235	4741,11	7,8	202,4
	20	215	6783,23	11,1	289,6
	30	205	8799,61	14,4	375,7
	40	205*	11131,48	18,3	475,2
	50	205*	13463,36	22,1	574,8
	60	205*	15795,23	25,9	674,3

Tabla 28. Cálculo de emisiones de CO2 para las distintas aceleraciones en la simulación 3

Fuente: Elaboración propia

Aquellos puntos de operación con consumos específicos con asterisco muestran presiones medias específicas superiores a las límite del motor, por lo que no se pueden alcanzar dichas potencias. El valor mostrado en la tabla indica el consumo específico máximo para las revoluciones por minuto de cada punto de operación.

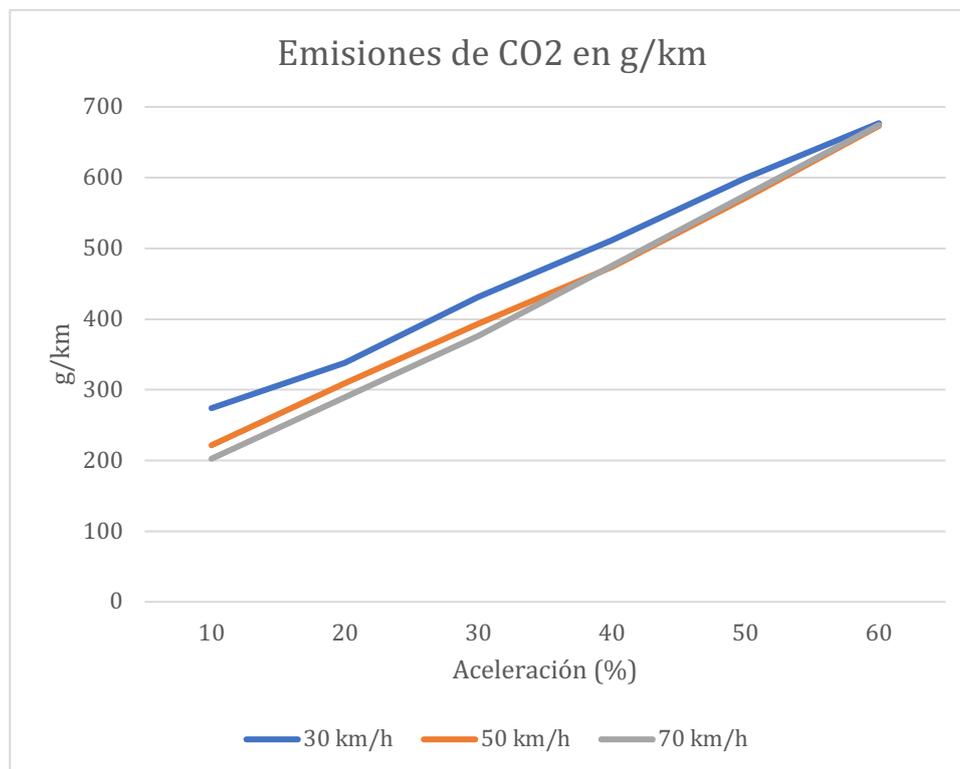


Imagen 26. Gráfica de emisiones de CO2 para las distintas aceleraciones en la simulación 3

Fuente: Elaboración propia

En esta gráfica se puede observar cómo las emisiones de CO2 aumentan bruscamente al aumentar la aceleración del vehículo, lo cual muestra la importancia de limitar la aceleración al 30% de la máxima del vehículo para reducir las emisiones de CO2.

### 6.2.3 Reprogramación de la ECU para reducir la emisión de gases NOx

Para reducir las emisiones de NOx a la atmósfera, principalmente en los vehículos diésel que son los que mas emiten, se propone llevar a cabo una reprogramación del software de la unidad de control del motor (ECU).

Los NOx que aparecen en los vehículos diésel se producen por las siguientes reacciones químicas:

- NOx térmico: partiendo del nitrógeno y del CO<sub>2</sub> del aire en condiciones de temperatura superiores a 1200°C y con exceso de aire.
- NOx puntual: debido a la oxidación de productos intermedios HCN de los hidrocarburos.
- NOx estructural o del combustible con temperaturas superiores a 680°C.

Por tanto, se puede observar que los factores principales para su emisión son: la temperatura, la presión de combustión y la relación oxidante/reductor. Así, las dos medidas que se proponen son:

#### 1. Aumento de la tasa de recirculación de los gases de escape EGR

La recirculación de gases de escape consiste en volver a introducir estos gases en la cámara de combustión con el fin de reducir la cantidad de oxígeno de la combustión y por tanto, la temperatura de la misma. Esta recirculación conlleva un peor rendimiento de la combustión, lo cual implica un mayor consumo de combustible y por ende mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, así como unas prestaciones menores en aquellos puntos de funcionamiento donde se aplica. Así, la evolución de los principales contaminantes en función de la tasa de EGR se presenta en la siguiente imagen:

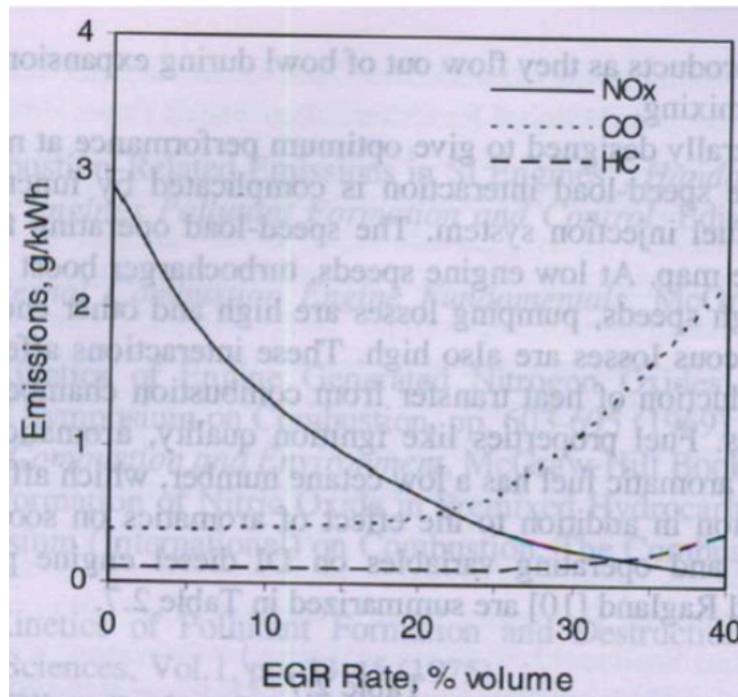


Imagen 27. Variación de contaminantes en función de la tasa de EGR

Fuente: Apuntes de motores térmicos, Juan Norverto

En la gráfica se puede observar cómo cambian los contaminantes (NO<sub>x</sub>, CO y HC) cuando cambia la tasa (%) de EGR, lo cual también es programable en la unidad de control. Esta gráfica muestra que una bajada de NO<sub>x</sub> al aumentar la tasa de EGR provoca un empeoramiento en las emisiones de CO e hidrocarburos sin quemar, lo cual implica una peor eficiencia en la combustión y un mayor consumo.

## 2. Retraso del punto de inyección

Al retrasar el momento de la inyección, se reduce la presión máxima, y por tanto, las probabilidades de que se forme NO<sub>x</sub>. Sin embargo, este retraso se traduce en una pérdida de prestaciones, ya que éstas dependen de la presión alcanzada en el ciclo termodinámico de la combustión, entre otros factores.

En el ajuste de motores, el NO<sub>x</sub> y el CO<sub>2</sub> son factores antagónicos, por lo que la mejora de unos parámetros afecta al resto de manera opuesta. Así, un retraso en la inyección mayor provocará menores emisiones de NO<sub>x</sub> pero un mayor consumo de combustible (BSFC, Break Specific Fuel Consumption en la imagen siguiente), lo cual conlleva unas emisiones de CO<sub>2</sub> mayores, como se puede observar en la siguiente gráfica:

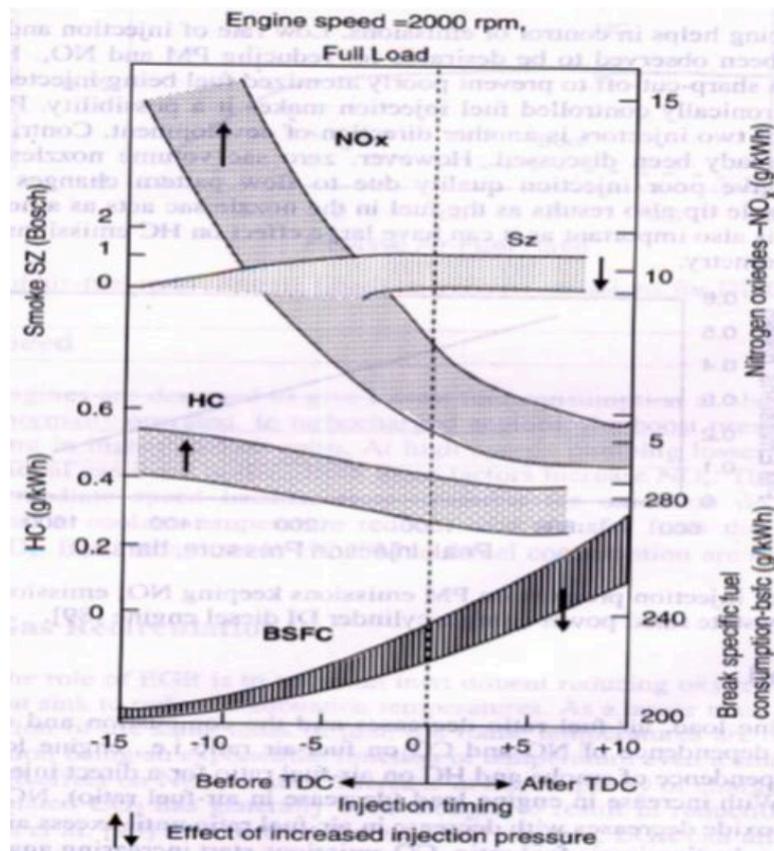


Imagen 28. Variación de contaminantes en función del punto de inyección en vehículos

Fuente: Apuntes de motores térmicos, Juan Norverto

En la gráfica se presenta cómo varía cada parámetro cuando cambia el avance de la inyección en un punto, lo cual es programable en la unidad de control. Por ejemplo, un retraso en la inyección (ir hacia la derecha en la imagen) supone una disminución de NOx pero un aumento del consumo de combustible específico, como se ha explicado previamente.

Por tanto, es esperable que la modificación del software afecte a los parámetros previamente mencionados, aumentando la tasa de EGR en los puntos de trabajo del vehículo además del retraso en las leyes de inyección. Estas dos actuaciones se pueden llevar a cabo por separado o en conjunto. En todo caso, estas medidas van encaminadas a reducir las presiones y la temperatura de combustión.

#### 6.2.4 Nueva homologación para ciudad

Las tres medidas presentadas anteriormente sirven para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y NOx principalmente (si bien es cierto que el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la reprogramación de la ECU se compensa con la reducción de CO<sub>2</sub>

mediante las limitaciones de velocidad y aceleración). Con el fin de reducir la contaminación de la ciudad de Madrid, se propone la creación de un nuevo modo de homologación ciudad, obligatorio dentro de la M-30 para poder circular, que incluya las tres medidas anteriores (limitación de velocidad a 60 km/h, limitación de aceleración al 30% de su aceleración máxima y reprogramación de la ECU para disminuir la emisión de NOx). Estas tres medidas deberían ser obligatorias para los vehículos nuevos, además de que se pueden adaptar a los vehículos en circulación a través de la reprogramación de la ECU (las limitaciones de velocidad y aceleración se pueden realizar en todos los vehículos, ya que también se pueden realizar a través de una reprogramación de la ECU).

Este nuevo modo ciudad debe obligar a los vehículos a disponer de un dispositivo GPS (los nuevos ya lo traen de serie mientras que los antiguos lo deberían incorporar) para poder conocer si se encuentran dentro de la zona obligatoria (dentro de la M-30). En este modo, el vehículo funcionará en un modo de bajas emisiones (priorizando la reducción de emisiones de NOx y CO2) mientras que el consumo de combustible aumentará, perdiendo prestaciones del motor.

Una vez el vehículo se encuentre fuera de este límite (corroborado por el dispositivo GPS), la ECU del vehículo priorizará el consumo de combustible y las prestaciones del motor, a costa de una mayor emisión de NOx. En este modo de homologación llamado de carretera, el vehículo ajustará su mapa motor en función del modo de homologación WLTP, el cual limita las emisiones priorizando el consumo de combustible.

Por tanto, se propone que los vehículos dispongan de dos modos: un modo ciudad obligatorio por GPS, que priorice la menor emisión de contaminantes, y un modo carretera que priorice el consumo de combustible y las prestaciones del motor, también obligatorio por GPS.



## 7 Conclusiones

Este trabajo de fin de máster ha pretendido desarrollar medidas coherentes y factibles para reducir la contaminación atmosférica provocada por el tráfico rodado, el cual es el responsable de más del 70% de la contaminación de Madrid.

Primeramente, se puede concluir que, tanto a nivel nacional como europeo, los problemas principales en cuanto a la calidad del aire ambiente están directamente relacionados con los óxidos de nitrógeno y las partículas en suspensión, los cuales se concentran en zonas urbanas y suburbanas, teniendo como causa principal el tráfico rodado.

En cuanto a la situación de Madrid, los datos de contaminantes del año 2018 han sido muy buenos comparados con los años anteriores principalmente por las favorables condiciones meteorológicas, pero aún así los límites han sido superiores a los valores límite. Con el fin de evitar que la calidad del aire dependa de unas buenas condiciones meteorológicas, la clave está en reducir las emisiones de los vehículos que circulan por Madrid.

Así, la solución directa sería cambiar todos los vehículos que contaminan que circulan por Madrid por vehículos eléctricos que no emitan contaminantes por el tubo de escape (dado que la generación de energía eléctrica sí que emite contaminantes, pero esta generación se hace lejos de las grandes ciudades). Sin embargo, esta transición no puede ser directa ni se puede realizar de manera instantánea. Así, aparte de las medidas propuestas por el gobierno de Manuela Carmena en el Plan A, se proponen medidas que favorezcan una transición suave hacia los coches eléctricos, dado que en 2040 se prohibirá matricular vehículos con motores de combustión.

De esta forma, para reducir las emisiones que provienen de los vehículos se propone que el ayuntamiento de Madrid renueve su flota de vehículos de manera gradual, con un potencial ahorro de 4.256.875 kg de CO<sub>2</sub>, 6.050 kg de NO<sub>x</sub> y 605 kg de partículas en suspensión. Esta medida sería una forma de dar ejemplo hacia los ciudadanos para que vean que la administración apuesta por el vehículo eléctrico y que éste es la única solución ante los problemas de contaminación actuales.

En cuanto a las medidas indirectas que se proponen en este trabajo hacia las administraciones, todas ellas están enfocadas en esta transición, fomentando políticas para la compra de nuevos vehículos no contaminantes y limitando el uso de los más contaminantes poco a poco, permitiendo a los ciudadanos adaptarse al nuevo horizonte. Todas estas medidas conllevan un gran coste económico para el

gobierno, el cual es necesario dada la gran importancia sobre la salud que tienen. Además, el gran problema de los ciudadanos por el cual no adquieren nuevos coches eléctricos, aparte de la incertidumbre, es la pérdida de poder adquisitivo ocurrida tras la crisis económica de 2007. Mientras que los precios han aumentado, los salarios no lo han hecho. Así, los gobiernos deberían fomentar la subida de salarios con incentivos hacia las empresas y no regulando por ley una subida del salario mínimo, como se ha hecho recientemente. Además, debe fomentar el cambio de flotas de vehículos de empresas hacia vehículos eléctricos, con incentivos a aquellas que lo cumplan.

Por otro lado, mientras ocurre esta transición hacia el vehículo eléctrico, la administración debe dar pasos hacia la reducción de vehículos contaminantes. La medida de reducir el tráfico en el centro (Madrid Central) es completamente necesaria (como hacen todas las ciudades grandes europeas) para intentar concienciar a los ciudadanos en el uso del transporte público y la reducción de uso de vehículos particulares. Para ello, Madrid debe contar con un sistema de transporte público de calidad y asequible, para lo cual también se requieren altas inversiones.

Dentro de las medidas de reducción del tráfico, la reducción de la circulación del taxi es clave para garantizar una mejor calidad del aire, así como una mejor fluidez del tráfico de la capital. De media, cada taxi realiza cerca de 100 kilómetros al día sin ocupantes, lo cual implica una gran cantidad de contaminación que se puede evitar fácilmente con una aplicación móvil para captar clientes.

Además, la construcción y uso de aparcamientos disuasorios en las afueras es una de las medidas clave para reducir el tráfico en el centro de la ciudad. Esta medida asociada a un sistema de transporte público de calidad es imprescindible para aquellos que no pueden permitirse una vivienda en el centro de Madrid y se ven obligados a vivir en ciudades más alejadas.

Por último, se debería fomentar la compra y uso de vehículos pequeños de dos o cuatro plazas (tipo Smart) para circular por la ciudad, dado que ocupan menos y son suficientes para las necesidades de los ciudadanos (la mayor parte de vehículos en horas punta van vacíos).

En cuanto a los fabricantes, en este trabajo de fin de máster se ha intentado reducir específicamente los óxidos de nitrógeno, dado que es el contaminante más problemático en la ciudad de Madrid, ya que, aparte de causar cerca de 8.000 muertes al año, es el culpable del smog fotoquímico. Así, se propone llevar a cabo una reprogramación de la unidad de control de los motores como la que realizó Volkswagen en el escándalo de las emisiones de Estados Unidos de 2015. Estos vehículos reducían la emisión de óxidos de nitrógeno en el banco de rodillos,

mientras que al terminar este test, reducían el consumo de combustible emitiendo muchos más óxidos de nitrógeno que los que homologaban. Así, esta reducción de óxidos de nitrógeno a costa de aumentar el combustible y el dióxido de carbono se podría llevar a cabo en un modo ciudad para evitar contaminar en el centro de las ciudades. Esta reducción de óxidos de nitrógeno se puede conseguir mediante el aumento de la tasa de recirculación de los gases de escape (EGR) y mediante el retraso del punto de inyección, ambos dirigidos a reducir la presión y la temperatura de la combustión.

Este modo ciudad iría ligado a una limitación de la velocidad a 60 kilómetros por hora en ciudad y a la limitación de la aceleración al 30% de la aceleración máxima del vehículo siempre y cuando se encuentren dentro de un radio definido vía GPS (en nuestro caso hemos supuesto la zona de bajas emisiones como el interior de la M-30). La reducción de dióxido de carbono que implican estas medidas ha quedado contrastada con las simulaciones realizadas, las cuales compensan el aumento de dióxido de carbono de las medidas propuestas para disminuir los óxidos de nitrógeno.

Sin duda estas limitaciones de velocidad y aceleración son polémicas y no agradarán mucho a una parte de la opinión pública. Aquí entra la tercera variable de la ecuación. Para que una medida tenga éxito necesita tres factores: políticas que fomenten la medida, tecnología para poder llevarla a cabo y la concienciación ciudadana a través de la educación. Una vez mencionado el compromiso que debe adquirir la administración y que la tecnología para reducir emisiones existe, es estrictamente necesario concienciar a la ciudadanía de que la solución para mejorar la calidad del aire pasa por un compromiso de todos cueste lo que cueste. Si bien es cierto que las administraciones deberían demandar más investigación a los fabricantes para proveer soluciones que no limiten la libertad de los ciudadanos, mientras se buscan nuevas soluciones, hay que concienciar a los ciudadanos de que la mejora de la calidad del aire está en sus manos y que todos (políticos, fabricantes y usuarios) debemos hacer esfuerzos para conseguirlo.



## 8 Bibliografía

- Álvaros Sauras, M. Tineo. 2019. "Diésel, Gasolina, Híbrido, Eléctrico, de Gas... ¿qué Coche Me Compro?" *Autofácil*. <https://www.autofacil.es/coche-compro/2018/03/15/motor-elijo-coche-guia-compra/43214.html>.
- Amato F., Alastuey A., Karanasiou A., Lucarelli F., Nava S., Calzolari G., Severi M., Becagli S., Gianelle V.L., Colombi C., Alves C., Custódio D., Harrison Nunes T., Cerqueira M., Pio C., Eleftheriadis K., Diapouli E., Reche C., Minguillón M.C., Manousakas M.I., Maggos T., Vratolis S., and Querol X. R.M. 2016. "AIRUSE-LIFE+: A Harmonized PM Speciation and Source Apportionment in Five Southern European Cities."
- Ayuntamiento de Madrid. 2017. "Plan de Calidad de Aire y Cambio Climático de Madrid," 199.
- . 2018. "Memoria Anual Calidad Del Aire Madrid 2018."
- Borge, R., J. Lumbreras, J. Perez, D. Paz, M. Vedrenne, J.M. Andrés, and E. Rodríguez. 2014. "Emission Inventories and Modeling Requirements for the Development of Air Quality Plans. Application to Madrid (Spain)."
- Constantini, Luca, Clara Blanchar, Ignacio Zafra, Antonio Jesús Mora, Pablo Guimón, Silvia Ayuso, Enrique Müller, Lorena Pacho, and Claudi Pérez. 2018. "Qué Hacen Las Grandes Ciudades Para Frenar La Contaminación." *El País*. [https://elpais.com/internacional/2018/05/17/actualidad/1526553924\\_104672.html#menu](https://elpais.com/internacional/2018/05/17/actualidad/1526553924_104672.html#menu).
- Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental de Madrid. 2018. "Estudio Del Parque Circulante de La Ciudad de Madrid 2017."
- Ecologistas en acción. 2018. "Distintivos Ambientales de La DGT y Emisiones En Condiciones Reales."
- EEA. 2016. *Air Quality in Europe Report*. *European Environment Agency*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63433-7.50001-8>.
- . 2017. "Air Quality in Europe 2017. European Environmental Agency." <https://www.eea.europa.eu/%0Dpublications/air-quality-in-europe-2017>.
- EMEP-CEIP. 2017. "Air Pollutant Emissions Data Viewer (CLRTAP Convention)."
- Festy, Bernard. 2013. "Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution - REVIHAAP Project. Technical Report. World Health Organization Regional Office for Europe 2013." *Pollution Atmospherique*, no. 219.
- Fuentes, Victoria. 2018. "WLTP Entra En Vigor: Todo Lo Que Hay Que Saber Sobre El Nuevo Ciclo de Consumo Para Coches."

<https://www.motorpasion.com/industria/wltp-entra-vigor-todo-que-hay-que-saber-nuevo-ciclo-consumo-para-coches>.

García, Mauricio Velasco. 2018. "La Calidad Del Aire En La Ciudad De Madrid Durante 2018." *Ecologistas En Acción*.

"Madrid Central: Así Actúan Otras Ciudades Contra La Contaminación." 2019. *Europa Press*. <https://www.europapress.es/sociedad/noticia-caso-madrid-central-no-unico-asi-actuan-otras-ciudades-contra-contaminacion-20190529171518.html>.

MAPAMA. 2017. "Evaluación de La Calidad Del Aire En España 2016." Madrid. [http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/%0Dinformeevaluacioncalidadaireespana2016\\_tcm7-467179.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/%0Dinformeevaluacioncalidadaireespana2016_tcm7-467179.pdf).

Naturgy. 2018. *La Calidad Del Aire En Las Ciudades. Un Reto Mundial*. [www.fundaciongasnaturalfenosa.org](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org).

Querol, Xavier. 2017. "Airuse Summary Report 2016."

RACE. 2019. "Etiqueta Ambiental de La DGT de Emisiones Contaminantes: ¿cómo Es y Para Qué Sirve?" 2019. <https://www.race.es/etiqueta-ambiental-dgt>.

Ramos, Luis. 2017. "Ciclo de Homologación WLTP: Todo Lo Que Debes Saber." *Coches.Com*. <https://noticias.coches.com/consejos/ciclo-de-homologacion-wltp/248644>.

Serrano, Jorge. 2019. "Plan MUS de Madrid En 2019: Así Son Las Ayudas a La Compra de Coches Ecológicos." *Autopista*. <https://www.autopista.es/noticias-motor/articulo/plan-mus-de-madrid-en-2019-asi-son-las-ayudas-a-la-compra-de-coches-ecologicos>.

Song C., Wu L., Xie Y., He J., Chen X., Wang T., Lin Y., Jin T., Wang A., Liu Y., Dai Q., Liu B., Wang Y.N, Mao H. 2017. "Air Pollution in China: Status and Spatiotemporal Variations." *Environ*.

Tena, Alejandro. 2019. "Las Claves Del Nuevo Plan Moves: Hasta 5.000 Euros de Ayudas Por La Compra de Vehículos Eléctricos." *Público*. <https://www.publico.es/politica/coches-electricos-claves-nuevo-plan-moves-5000-euros-ayudas-compra-vehiculos-electricos.html>.

Villa, Lucía. 2018. "La Trampa En Las Nuevas Etiquetas Ambientales de La DGT." *Público*. <https://www.publico.es/sociedad/medio-ambiente-trampa-nuevas-etiquetas-ambientales-dgt.html>.

World Health Organization. 2005. "Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide." *World Health Organization WHO/SDE/PH* (Global update 2005): 5–18.

[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf;jsessionid=D984E0D32F3FA3C11D9E13E9E8C69736?sequence=1.](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf;jsessionid=D984E0D32F3FA3C11D9E13E9E8C69736?sequence=1)